

文章编号: 0258-7025(2009)08-1951-06

大发光面积激光二极管堆栈抽运结构

赵天卓^{1,2,3} 樊仲维^{1,3} 陈亚楠⁴ 麻云凤^{1,2,3} 邱基斯^{1,2,3} 冯承勇^{1,2,3}

1 中国科学院光电研究院光电系统工程部, 北京 100190
2 中国科学院研究生院物理学院, 北京 100039
3 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085
4 光电系统信息控制技术国家级重点实验室, 河北 三河 065201

摘要 由于半导体激光器(LD)在快轴和慢轴两个方向上发散角的不一致和耦合结构的缩束作用,从耦合结构输出的抽运光在经过空间传播后会发生劣化而降低效率。而通过调整激光二极管抽运堆栈结构中激光二极管阵列(LDA)的排布方式,可以改善耦合结构出口后一定距离处光场的空间分布,从而更好地保证抽运光与信号光的匹配。在通过对耦合结构出口的光场追迹分析后,得到了激光二极管堆栈(LDS)排布结构对耦合结构出射光空间分布特性的影响。通过某工程的实验验证,得到了良好的输出光斑和接近 90% 的传输效率。

关键词 激光技术; 激光二极管堆栈; 光束整形; 半导体激光抽运; 导光管

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL20093608.1951

Large Area Laser Diode Stack Pumping Structure

Zhao Tianzhuo^{1,2,3} Fan Zhongwei^{1,3} Chen Yanan⁴ Ma Yunfeng^{1,2,3}
Qiu Jisi^{1,2,3} Feng Chengyong^{1,2,3}

¹ Opto-Electronics System Department, The Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
² Physics Department, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
³ Beijing Guoke Laser Technology Limited Company, Beijing 100085, China
⁴ National Laboratory of Electro-Optic System Technology, Sanhe, Hebei 065201, China

Abstract Because of the different divergences is in slow and fast axes of laser diodes (LD) and the compress of the coupling structure, the pumped beam output from the coupling structure will be deteriorated. and its efficiency will be reduced. Whereas this problem can be well solved by adjusting the position and direction of laser diode arrays (LDA) in the stack. After ray tracing and analyzing of the output beam, the affection of laser diode stack (LDS) structure on the output beam distribution can be gotten. The project experiment test gets a good output spot and a coupling efficiency of up to 90% .

Key words laser technique; laser diodes stack; beam shaping; semiconductor laser pump; duct

1 引 言

大面积半导体激光器堆栈(LDS)已经应用于一些大功率放大结构中^[1~3]。由于目前技术水平中,

单 bar 条最高功率和封装结构的限制,堆栈总的发光面积往往大大超过工作物质的截面积。导光管(duct)作为一种良好的耦合器件,可以把光束从大

收稿日期: 2008-11-27; **收到修改稿日期:** 2008-12-23

基金项目: 国家 863 计划(2007AA03Z448)和北京市高成长企业自主创新科技专项项目资助课题。

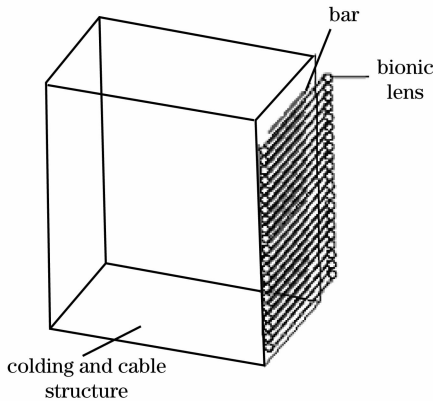
作者简介: 赵天卓(1980—),男,博士研究生,主要从事半导体抽运片状放大器方面的研究。E-mail: herachles@163.com

导师简介: 樊仲维(1965—),男,博士,研究员,主要从事全固态激光器方面的研究。E-mail: fanzw@gklaser.com

(通信联系人)

面积压缩到小的工作物质上,并具有高效、匀光、简洁等优点^[4]。在采用导光管进行耦合的结构中,由于半导体激光器堆栈的面积与导光管出口面积比较起来差异很大,会导致从导光管出射的抽运光有很大的发散角,虽然这一点在已有的文献中已有一定的阐述^[5,6],但对其详细的分析较少。而半导体激光器(LD)出射光在快轴和慢轴两个方向上发散的角度不同,这使得经过导光管出射后光束不对称地发散。这种从导光管出射的抽运光在空间上不能与工作物质中的信号光很好地匹配,而会导致效率降低。由于光学不变量的限制,对导光管的结构参数进行更改并不能解决导光管出口光在传输一定距离后两个方向发散程度不一致的问题^[7,8]。而适当地选择激光二极管阵列(LDA)在空间中的排布,可以使得光在导光管出口两个方向上发散角度更接近,光斑特性更均匀,从而更好地提高抽运效率。

本文对用于某工程的由 168 个 bar 条构成的总功率超过 25 kW,发光面积约 65 mm×65 mm 的激光二极管抽运堆栈的排布方式进行了分析,并通过光线追迹模拟得到了在导光管出口和透镜后表面的光场分布。通过对不同 LDA 排布形状的堆栈



结构的模拟,得到了较优化的堆栈中阵列的排布方式,并通过对导光管出射光斑的特性分析,进行了排布参数的优化选取。最后通过实验验证了 LDS 排布结构对抽运效率、抽运光斑形状的影响。

2 激光二极管堆栈和缩束器件结构参数

在模拟和实际中激光二极管阵列的各个结构参数如下:单线发光长度 10 mm,上面排列 75 个发光点,间隔 0.133 mm;每个 bar 条功率 150 W,总共 168 个 bar 条功率 25200 W。在快轴方向两个 bar 条间隔 1.1 mm,每个阵列可由任意数目 bar 条构成,但由于封装因素,每个阵列的外围存在一定的不发光区域,慢轴方向上两侧各 3.5 mm,快轴方向上两侧各 4 mm。在把多个阵列组合成堆栈使用时,由于阵列之间的不发光间隙很大,过多的阵列数目会导致总发光区域面积的增大,从而降低耦合效率和增大导光管出射光束的发散角度,因此将上述 bar 条总共制作成了 8 个阵列,每个阵列的结构如图 1 所示。



图 1 激光二极管阵列结构和照片

Fig. 1 LDA structure and photograph

同时,每个 bar 条前安装柱透镜进行准直,准直后快轴发散角在 3°以内,慢轴方向发散角由 bar 条本身决定,为 10°,对于每个激光二极管发光点采用

$$I(\theta_x, \theta_y) = I_0 e^{-2 \left[\left(\frac{\theta_x}{\alpha_x} \right)^2 + \left(\frac{\theta_y}{\alpha_y} \right)^2 \right]} \quad (1)$$

来表征其输出光斑的空间分布^[9]。其中 α_x, α_y 为 LD 的水平 and 垂直发散角, φ_x, φ_y 为能量在空间角度上的水平、垂直分量。

导光管的主要结构参量有:长度 L , 入光口宽度 X 和高度 Y , 出光口宽度 x 和高度 y 。由这些参量

得到的导光管侧壁与轴线夹角为

$$\theta_x = \arctan \frac{X-x}{2L}, \quad \theta_y = \arctan \frac{Y-y}{2L}. \quad (2)$$

对于在一个水平面内传播的光线,假设光线与导光管侧壁的夹角按照反射次数分别表示为 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \dots$, LDA 发出的光在导光管的侧壁反射时,第 n 次反射光线与导光管轴线的夹角可表示为^[10]

$$\alpha_n = \alpha_0 + 2n\theta. \quad (3)$$

3 激光二极管阵列导光管效率的理论分析

在对导光管进行效率的理论计算时,可以采用分类计算的方法。由于导光管的侧壁为镜面,因此可以把导光管按照其空间结构进行展开,导光管展开后构成一个由相同数目的入口和出口截面组成的双层近球形壳结构,如图 2 所示。其中内部小球面由导光管出口面组合构成,外部大球面由导光管入口面组合构成,两个近球形壳的间距就是导光管的长度,而内球壳半径和外球壳半径可以由(3)式结合其结构参数计算得到

$$r_x = \frac{XL}{X-x} = \frac{1}{2}x \cot \theta_x, r_y = \frac{YL}{Y-y} = \frac{1}{2}y \cot \theta_y. \tag{4}$$

$$R_x = \frac{XL}{X-x} = r_x + L, R_y = \frac{YL}{Y-y} = r_y + L. \tag{5}$$

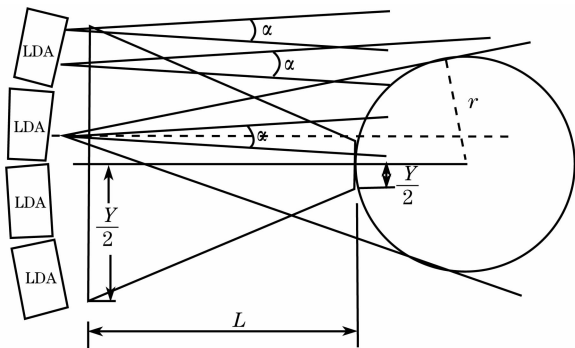


图 2 激光二极管阵列效率计算方法

Fig. 2 Calculation of transmitting efficiency of LDA

对于各个发光点发出的光,如果能够从内球向发光点投影的圆范围内射出,这个点发出的光就将成从导光管的出口射出,如果没有能够照射到这个投射面上,光将在导光管中经过多次反射后从导光管入口反射回去。因此在理论上所设计的阵列中各个 bar 条发出的光全部从内部小球面内经过,效率可以达到 100%。但在实际的工程结构中,由于 bar 条各个发光点存在着高斯分布边缘的微弱能量分布区域,以及各个 bar 条发光方向、角度差异、整体安装的公差、导光管侧壁反射效率及缝隙的损耗等因素,实际的效率会低于理论效率。

4 弧形与平面排布的光学追迹比较

在分析过程中,用 ZEMAX 软件对每个发光点按照 LD 的高斯光强分布特性进行了模拟^[11,12],总

共追迹了 2,000,000 条随机光线。由于分析时认为这些光线具有相同的光功率,在探测面上光强分布与光线数量就呈现相同的分布特性^[13,14]。通过计算光线的条数,就可以得到等效的光强,从而得到导光管的效率和出口处光场的空间分布。根据前述的理论,在对多种排布结构进行分析和模拟后,选取了如图 3 中的结构。这是由于这种结构输出的光场在慢轴和快轴两个方向上的发散角度比较接近,这样才能更好地与行波放大的信号光匹配。

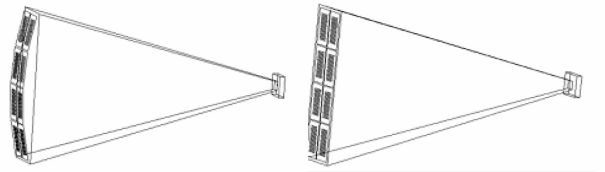


图 3 激光二极管堆栈中阵列的排布方式和导光管

Fig. 3 Module of positions of arc and plane laser diode arrays in stack

在实际的工程设计中,由于抽运能量密度的要求,耦合导光管出口为边长 10 mm 的正方形。而根据信号光放大部分的多程行波提取结构,从导光管小口出射的抽运光发散角 ω_{out} 受到信号光的提取角度限制,为全角 30°。根据光学不变量原理

$$D_{in} \sin(\omega_{in}) = D_{out} \sin(\omega_{out}), \tag{6}$$

对于平面排布的结构来说,由于堆栈发出的光线经过准直后快轴方向发散角为 3°,慢轴方向发散角为 10°,则快轴方向发光区域边长 95.5 mm,慢轴方向发光区域边长 28.8 mm 时恰好满足出射光的角度匹配。但对于这样的堆栈发光面积,存在着由于发光区域在快轴方向过长,导致了导光管侧壁与轴线夹角 θ_y 很大的问题。按照入口高度 Y 取 95.5 mm,宽度 X 取 28.8 mm,出口 x, y 分别取 10 mm 和不同的长度进行光线追迹模拟可以得知,导光管的长度也需要在 400 mm 以上才能保证效率达到 95%。在实际工程中,侧壁采用镀银的玻璃板进行反射,在 15°~75° 的范围内对于 802 nm 波长反射率进行了实际测量,数值均在 97% 左右,并且导光管粘接后存在四个反射率很低的缝隙,这也将影响其传输效率^[15,16]。考虑到侧壁反射损耗和其他的损耗因素,如果选取侧壁反射率为 95% 进行光线追迹模拟,经过光线追迹得到 400 mm 长的导光管出口效率会从 95% 下降到 76.6%,出口经过 5 mm 钽玻璃的光场分布如图 4 中(a)所示。在经过钽玻璃片后的光场在快轴和慢轴两个方向上发散的度不一致,这会使得抽运光和信号光的空

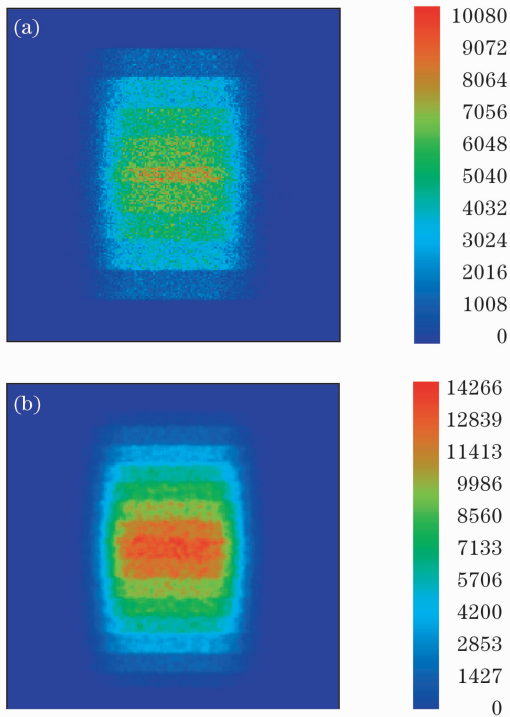


图 4 平面排布激光二极管阵列输出光场的模拟结果
Fig. 4 Simulation results of plane laser diode stack output optical field

叠,从而导致效率的降低。因此在结构设计时,考虑到导光管的理论效率和损耗因素,并结合输出光场的特性,选取了 250 mm 的较优化的长度,这一长度对应的钹玻璃后表面光斑如图 4(b)所示。

把快轴和慢轴方向的阵列排布成适当大小的弧形,这样可以减少光在侧壁上的反射次数,增加抽运传输效率,而且可以在一定程度上改善出射光斑的特性。同时 bar 条发光朝向的适当改变也可以调整导光管出射光的空间强度分布。对于前述的导光管,把阵列排布成半径为 150 mm, 250 mm, 350 mm, 450 mm 的弧形,进行模拟后得到的结果如图 5 中的(a),(b),(c),(d)所示。模拟结果显示,在弧形半径与导光管长度较接近的情况下,出口的光场和经过工作物质后的光场分布与放大需求的形状匹配得较好,并且只有在这种情况下可以保持一个较好的耦合效率。这是由于接近于导光管长度的弧形半径使得各个阵列发出的光汇聚在出口附近。在选择了弧形半径为 250 mm 的结构时,出口的光场和经过工作物质后的光斑形状与需求的形状匹配得较好,在侧壁反射率为 95% 的情况下,出口的光能效率仍然可以达到 92.7%。

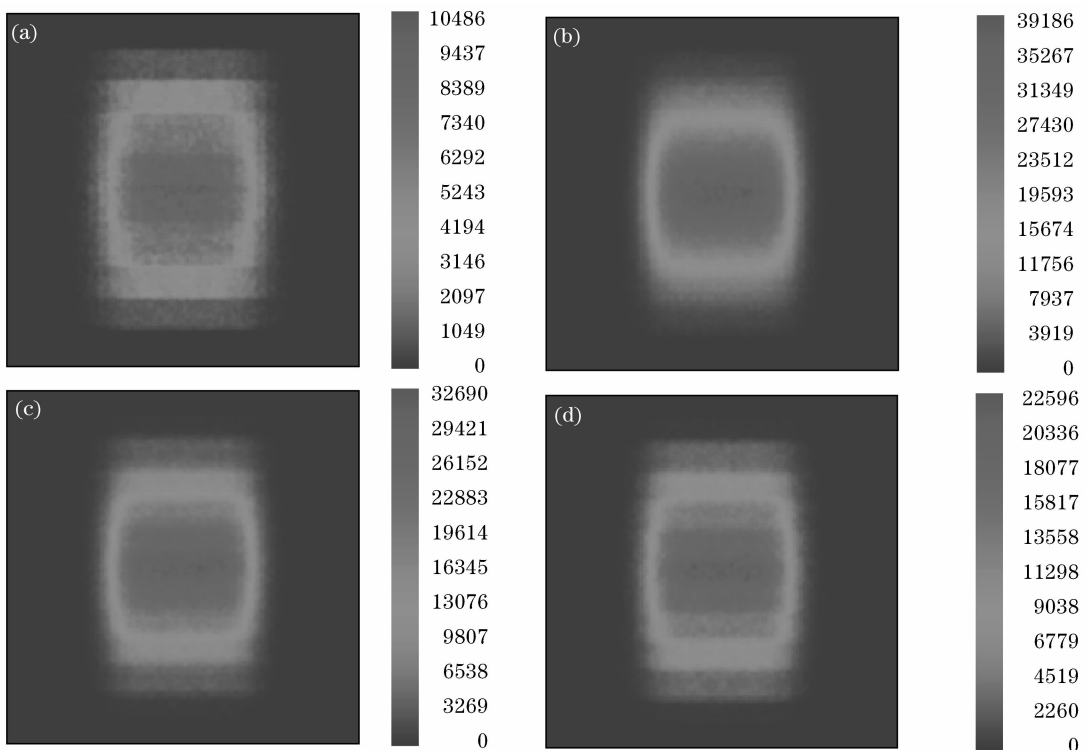
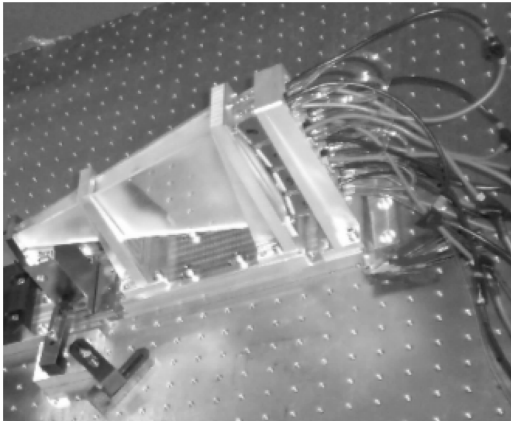


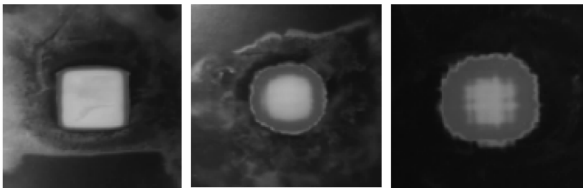
图 5 不同激光二极管堆栈弧形半径的模拟结果。(a) 150 mm; (b) 250 mm; (c) 350 mm; (d) 450 mm
Fig. 5 Results of arc LDS with different radius of 150 mm (a), 250 mm (b), 350 mm (c) and 450 mm (d)

5 实验结果和分析

按照上述理论设计的抽运结构进行相应的机械结构设计和装校测试,其实验装置如图 6(a)所示。实验测得抽运效率达到 86.2%,采用曝光像纸采集的导光管出口光斑形状如图 6(b)所示,从左到右依次对应导光管出口处,5 mm 处和 10 mm 处的光斑。对于平面排布的半导体激光二极管堆栈结构,模拟结果显示如果忽略侧壁反射损耗,选择长度达到 430 mm 时可以得到最高的效率为 71%,但如果按照侧壁反射损耗 5% 计算,其最优化长度为 280 mm,效率只有 43%。在采用与图 6(a)中相同的导光管进行测试时发现,这一抽运结构甚至不能在像纸上产生痕迹,这是由于大量阵列中激光二极管发出的光经过导光管反射后,从出口处反射回去了。实验结果表明,模拟结果较好地反应了阵列排布方式对输出光场特性的影响。



(a)



(b)

图 6 激光二极管堆栈抽运实验装置(a)和结果(b)

Fig. 6 Device (a) and results (b) photograph of LDS stack pumping experiment

6 结 论

介绍了用于某工程的激光二极管堆栈抽运结构的优化,主要讨论了激光二极管堆栈排布结构对输出光场的影响。通过追迹分析得知,堆栈中激光二极管阵列的排布方式不仅会影响到耦合输出的效率,改变导光管最佳长度点,还会引起输出光场特性的变化。如果把堆栈中的激光二极管阵列进行弧形

排布,可以提高效率,改善输出抽运光在工作晶体中的传输特性。而进一步的分析表明,当弧形半径与导光管长度相接近时,耦合效率会更高,输出的光场更接近阶跃能量分布。

参 考 文 献

- 1 Satoshi Yamaguchi, Tetsuro Kobayashi, Yoshimasa Saito *et al.*. Efficient Nd : YAG laser end pumped by a high-power multi-stripe laser diode bar with multi-prism array coupling [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **38**(9): 1430~1435
- 2 Raymond J. Beach. Hollow lensing duct : United States, USO06160934A [P]. 2000
- 3 Cui Jianfeng, Fan Zhongwei, Hao Liang *et al.*. 60 times Nd: glass laser amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1456
崔建丰 樊仲维 郝亮等. 60倍高增益玻璃放大器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10): 1456
- 4 Gao Hongyuan, Fu Rulian, Chen Desheng *et al.*. Design of hollow duct as coupling system in solid-state laser end-pumped by LDA [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(5): 419~423
邵洪云,傅汝廉,陈德胜等. LDA端抽运固体激光器的耦合系统空心导管的设计[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(5): 419~423
- 5 Jia Wei, Hu Yongming, Li Mingzhong *et al.*. Simulation and design of hollow lens duct as a new kind of coupling system for high power laser diode arrays [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 939~942
贾伟,胡永明,李明中等. 空心透镜导管的模拟与设计[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8): 939~942
- 6 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
- 7 Zhang Biao, Chen Meng, Li Gang. The coupling theory design of the high power semiconductor lasers [J]. *Laser Technology*, 2005, **25**(1): 109~114
张彪,陈檬,李港. 面阵半导体激光器的耦合理论设计[J]. *激光技术*, 2005, **25**(1): 109~114
- 8 Shigeki Tokita. 23.7 W picosecond cryogenic Yb : YAG multipass amplifier[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(7): 3955~3961
- 9 Wang Qiang, Zeng Xiaodong, An Yuying. A far-field distribution model describing the double-peak beam of high-power laser diodes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 619~622
王强,曾晓东,安毓英. 大功率激光二极管双峰结构远场分布模型[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 619~622
- 10 Zhao Tianzhuo, Fan Zhongwei, Cui Jianfeng *et al.*. Research on Coupling Duct for Slab Amplifier pumping [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **36**(11): 69~75
赵天卓,樊仲维,崔建丰等. 用于片状放大器抽运的耦合导光管研究[J]. *光电工程*, 2008, **36**(11): 69~75
- 11 G. Feugnet, C. Bussac, C. Larat *et al.*. High efficiency TEM₀₀ Nd : YVO₄ laser longitudinally pumped by a high-power array [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(2): 157~159
- 12 Deng Shitao, Li Xiaotong, Cen Zhaofeng *et al.*. Mitigating damage of the ghost in high power laser facilities by real-ray trace [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 585~588
邓诗涛,李晓彤,岑兆丰等. 高功率激光装置中鬼像的模拟应用实际光线追迹法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 585~588
- 13 Wang Yunhua, Guo Lixin, Wu Zhensen. Light scattering of plane wave/Gaussian beam from two adjacent objects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1711~1718
王运华,郭立新,吴振森. 两个相邻目标对平面波、高斯波束的光散射[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1711~1718

- 14 Gao Yunkai, Jiang Yuntao, Li Xuechun. Laser pulse-shaping system based on aperture-coupled striplines [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(12): 1619~1622
高云凯, 蒋运涛, 李学春. 基于孔耦合带状线的激光脉冲整形系统[J]. *中国激光*, 2005, **32**(12): 1619~1622
- 15 Wang Mingjun, Wu Zhensen, Li Yingle *et al.*. Modeling and measuring the pulse laser scattering echo power from whole

- dimension target[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1557~1561
王明军, 吴振森, 李应乐 等. 全尺寸目标激光脉冲后向散射回波功率测定和建模[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1557~1561
- 16 Tianbao Yu, Xiaoqing Jiang, Qinghua Liao *et al.*. Self-imaging effect in photonic crystal multimode waveguides exhibiting no band gaps[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(12): 690~692

《中国激光》“激光制造”专题征稿启事

激光制造技术是国家重点支持和推动的一项高新技术,近年来在涉及国家安全、国防建设、高新技术产业化和科技前沿等领域已取得多项重大研究成果。《中国激光》计划于2009年12月正刊(EI核心收录)上推出“激光制造”专题栏目,现特向国内外广大专家学者征集“激光加工”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该领域最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 激光强化与材料制备
- 激光直接制造与微纳加工
- 激光器与激光加工系统
- 激光冲击与强化
- 激光焊接与切割
- 激光烧结与沉积
- 激光新应用与过程模拟
- 其他

特邀组稿专家:

钟敏霖 教授 清华大学机械工程系 E-mail: zhml@tsinghua.edu.cn 010-62772993

截稿日期: 2009年9月30日

投稿方式以及格式:

可直接将稿件电子版发至“激光制造”专题组稿专家、《中国激光》常务编委、清华大学钟敏霖教授邮箱: zhml@tsinghua.edu.cn(主题标明“激光制造专题”投稿),或通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“激光制造专题”投稿),详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请咨询马沂编辑, E-mail: CJL@siom.ac.cn; 电话: 021-69918427。

《中国激光》编辑部