

# 高功率 Bounce 板条放大器链路热补偿 仿真及实验验证

李环环 李世光 马秀华\* 王君涛 朱小磊

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

**摘要** 对 Bounce 抽运结构的高功率板条激光放大器进行热仿真, 采用有限元数值分析获得了放大光束通过板条后的光程差分布, 利用二阶矩法计算出 Bounce 抽运热效应引入的相位畸变对光束质量  $M^2$  的影响, 为放大链路热效应的补偿给出指导。在采用高效传导冷却设计的三级板条级联放大链路实验装置中, 实验测得的每一放大级热焦距值与理论预期吻合良好。当放大器链路工作在 250 Hz 重复频率时, 插入热补偿中继光路, 最终获得单脉冲能量 537 mJ 的输出, 光束质量因子  $M_x^2 = 2.35, M_y^2 = 2.66$ 。

**关键词** 激光器; Bounce 抽运; 热效应; 有限元分析; 二阶矩法

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0302008

## Modeling and Experimental Study at Thermal Effect of High Power Bounce-Pumped Slab Amplifiers

Li Huanhuan Li Shiguang Ma Xiuhua Wang Juntao Zhu Xiaolei

(Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The theoretical simulation and experimental study on thermal effect of bounce-pumped slab amplifier is presented. Based on an efficient cooling of conductively cooled, the temperature distribution of the slab is calculated by finite element analysis, and the beam quality is calculated by the method of moments, which gives a guide for the thermal compensation. The focal length is obtained experimentally and the experimental results agree with the theoretical analysis well. When the three-stage amplifier is operated at the repetition frequency of 250 Hz, with a designed thermal compensation lens, an output laser whose pulse energy is 537 mJ and the beam quality factor  $M_x^2 = 2.35, M_y^2 = 2.66$ , is obtained.

**Key words** lasers; Bounce pump; thermal effect; finite element analysis; method of moments

**OCIS codes** 140.3280; 140.3295; 140.3320; 140.3580; 140.5560

### 1 引 言

在传导冷却高功率板条激光放大器中, Bounce 抽运方式因其较高的能量提取率, 从而在空间应用上受到广泛关注<sup>[1~4]</sup>。Bounce 抽运<sup>[2,3]</sup>方式是将激光二极管(LD)模块对准板条内激光束的全反射点, 由于在板条的抽运面上抽运光能量密度最高, 因此尽可能多地提取出了抽运能量, 提高了抽运光的利

用率, 同时减少了热沉积。目前对热效应的分析方法主要有解析法、数值模拟法、实验法。本文利用有限元法(FEM)的数值模拟法求解导热微分方程对 Bounce 板条进行热模拟, 这种方法具有很大的灵活性, 成为目前一种主要的分析手段。通过求解导热微分方程得出板条内的温度, 再使用光线追迹法, 求出 zigzag 面和垂直于 zigzag 面的光程差分布, 模拟

收稿日期: 2011-10-31; 收到修改稿日期: 2011-11-30

作者简介: 李环环(1984—), 女, 博士研究生, 主要从事全固态激光器技术方面的研究。E-mail: lhh350@163.com

导师简介: 朱小磊(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事全固态激光器技术及激光应用系统等方面的研究。

E-mail: xlzhu@siom.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: maxiuhua@gmail.com

计算结果对于预测激光板条热效应强弱,热效应的补偿提供了理论依据<sup>[5-9]</sup>,并利用二阶矩法<sup>[10]</sup>计算模拟出由于热效应引入的像差对光束质量的影响。

## 2 双侧 Bounce 抽运 Nd:YAG 激光板条热效应理论分析

针对一个双侧面抽运双侧面传导冷却的重复频率板条放大器做有限元分析(FEA)仿真。该放大器板条晶体尺寸为 110 mm×5 mm×5 mm,采用上下面传导散热<sup>[11]</sup>结合循环通水冷却,左右抽运的结

构。板条晶体两侧的 Bounce 点分别采用条状 LD 叠阵模块进行抽运。放大一级采用的单个 LD 叠阵模块峰值输出功率为 600 W,放大三级采用的单个 LD 叠阵模块峰值输出功率达到 900 W。每侧抽运 LD 的快轴方向通过梯形波导以进行压缩泵光的发散角,使得抽运均匀。宽高比 1:1 的设计是为了增加板条晶体的强韧度,不易因校装或工作时的应力而折断,端面切割成布儒斯特角。板条放大器 Bounce 抽运结构如图 1 所示,最后一个周期没有抽运是为了减小端面效应。

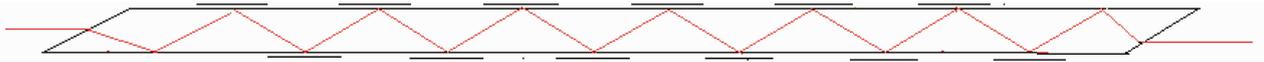


图 1 Bounce 抽运 LD 模块排布方式示意图

Fig. 1 Schematic of the LD stacks placed along the length direction with space between each other, which shows bounce pump configuration

首先建立热效应分析模型,分析在激光介质内形成的温度场,最终归结于激光晶体由于热梯度导致的光学特性变化。为了简化模型,只考虑热的单向作用,并且只分析稳态热效应模型。分析中忽略抽运光在  $z$  方向的差异,即认为每一个通光平面( $xy$ 面)抽运光分布相同,假定抽运光在宽度方向上指数衰减分布,在厚度方向上均匀分布,光热转换效率根据采用的激光介质 Nd:YAG 选定为 30%,工作在重复频率 250 Hz,占空比 5%。通过求解二维的热传导稳态偏微分方程来深入分析板条内部的温度

$T(x, y)$ 分布特征:

$$\nabla^2 T(x, y) + \frac{Q(x, y)}{k} = 0. \quad (1)$$

采用有限元法用计算机模拟的方法来求解<sup>[12,13]</sup>, FEA 温度分布时采用的换热系数 12 kW/(m<sup>2</sup>·k),晶体传导冷却面的边界温度 30°,晶体抽运方向侧面按照绝热处理。通过模拟得到板条内温度分布(由于热应力对热焦距的影响很小,为 10<sup>-2</sup>数量级,这里不予考虑其对热焦距的影响),如图 2 所示。

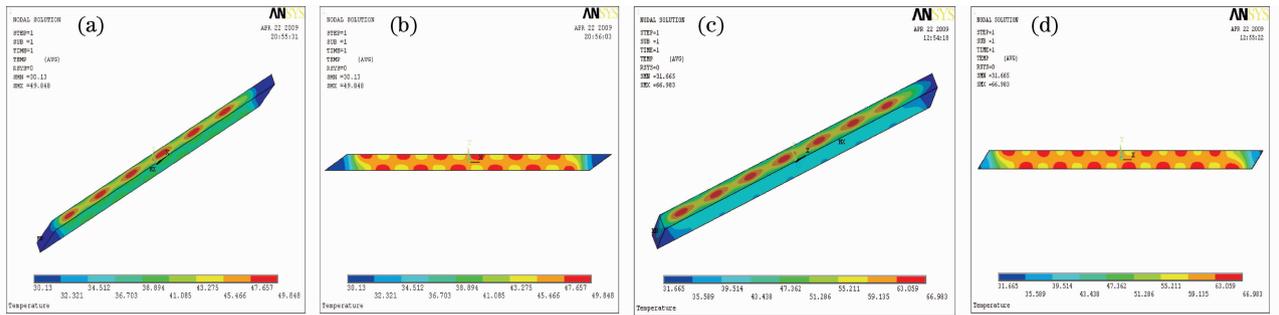


图 2 Bounce 放大板条的温度分布模拟。(a),(b)放大一级板条温度分布;(c),(d)放大三级板条温度分布

Fig. 2 Temperature distribution simulation of bounce pump slab. (a), (b) Temperature distribution of the first stage; (c), (d) temperature distribution of the third stage

得到板条内的温度分布后,从板条的温度模型中提取出每个最小微元的温度值,则可以得到一个温度值的三维矩阵。再使用光线追迹法,得到出射面的光程差三维图,从中分别提取出在 zigzag 面内和在垂直于 zigzag 面内的光程差曲线图<sup>[14]</sup>,采用抛物线型进行拟合,并将实际光程差曲线与拟合抛物线做差值,如图 3,4 所示。从图中可以看出, zigzag 面内的光程差曲线已经不是完整的抛物线,呈现出

一定的高阶效应,高阶部分的产生是由于 Bounce 抽运使板条内温度分布不均匀造成的。为了计算高阶效应对光束质量的影响,让一个高斯基模经过一个相位分布为引入的高阶效应的相位板,利用二阶矩法<sup>[5]</sup>,计算对光束质量的影响。经过相位板后的光波场的复振幅表达式为

$$u = E(r)\exp[i\varphi(r)], \quad (2)$$

$$M^2 = k(Aa_{\text{eff}}^2 - b^2/4)^{1/2}, \quad (3)$$

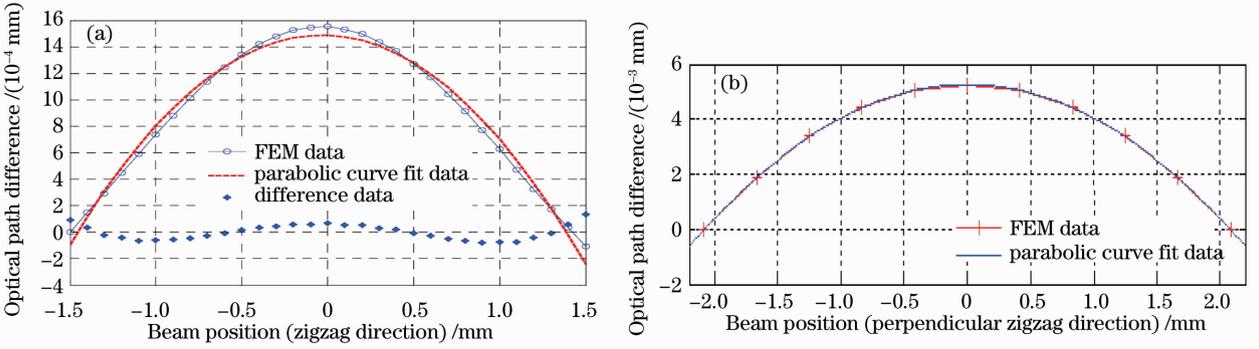


图3 放大一级板条(a) zigzag 方向和(b)垂直于 zigzag 方向上的光程差分布

Fig. 3 Distribution of optical path difference at (a) zigzag direction and (b) perpendicular direction of the first stage

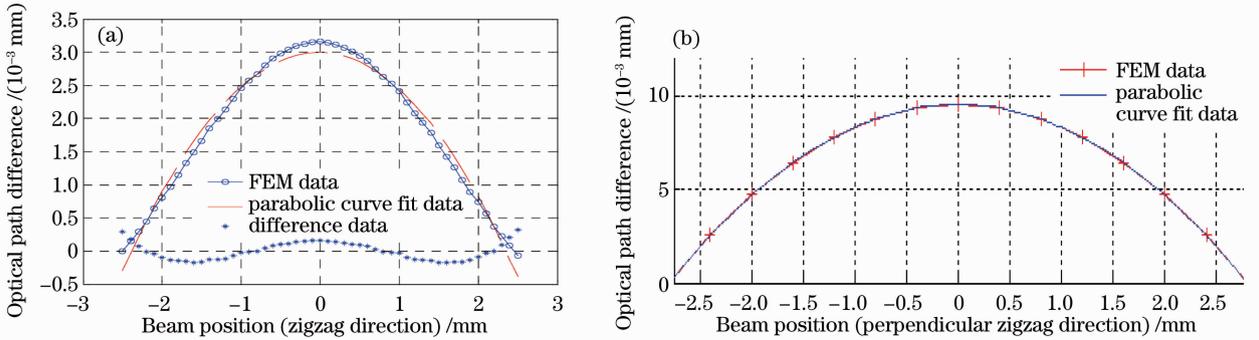


图4 放大三级板条(a) zigzag 方向和(b)垂直于 zigzag 方向上的光程差分布

Fig. 4 Distribution of optical path difference at (a) zigzag direction and (b) perpendicular direction of the third stage

式中  $k$  为波数,  $E(r)$  为初相位为零的高斯基模,  $\varphi$  为相位板的相位分布,

$$a_{\text{eff}}^2 = \frac{\int_0^{\infty} |E(r)|^2 r^3 dr}{\int_0^{\infty} |E(r)|^2 r dr}, \quad (4)$$

$$A = \frac{1}{k^2} \frac{\int_0^{\infty} (\nabla E)^2 r dr}{\int_0^{\infty} E^2 r dr} + \frac{\int_0^{\infty} (\nabla \varphi/k)^2 E^2 r dr}{\int_0^{\infty} E^2 r dr}, \quad (5)$$

$$b = \frac{2}{k} \frac{\int_0^{\infty} (r \nabla \varphi) E^2 r dr}{\int_0^{\infty} E^2 r dr}. \quad (6)$$

经过计算分别得到经过一级放大,二级放大,三级放大后的光束质量  $M^2$  的理论值为 1.46, 2.6, 3.5。第三级放大器晶体板条尺寸为 125 mm × 6 mm × 6 mm。

### 3 实验研究

实验研究了一个三级 Bounce 板条放大链路的

放大特性<sup>[15]</sup>。图 5 给出了三级板条放大器系统的实验装置原理图。对每一放大器板条在 zigzag 面和垂直于 zigzag 面内的热焦距采用透镜辅助法进行实验测量<sup>[16]</sup>。辅助透镜法即经过准直扩束后的 He-Ne 激光束经过激光板条,由于热透镜效应会发生会聚,焦点经辅助透镜成像,利用光电探测器确定像点的位置,根据几何关系和透镜成像公式可得热焦距。表 1 给出了各放大级模拟和实验测量得到的热焦距值,可以看到理论模拟结果和实际测量结果吻合良好。从理论模拟和实验测量的结果都可以看出,垂直于 zigzag 面比 zigzag 面热聚焦程度严重,这是因为在垂直于 zigzag 面对板条进行了通水冷却,所以这个方向的热梯度大,导致热聚焦比较严重。

表 1 三个放大级在 zigzag 面内和垂直于 zigzag 面内的热焦距模拟值和测量值

Table 1 Simulation and experimental results at zigzag and perpendicular zigzag direction of three amplifying stages

Stage of amplifiers	Simulation	experiment
Zigzag direction of first stage /m	0.685	0.6
Perpendicular zigzag direction of first direction /m	0.318	0.3
Zigzag direction of third stage /m	1.252	1.2
Perpendicular zigzag direction of third direction /m	0.316	0.25

从表 1 的数据可以看到,抽运功率最大时,板条晶体热焦距变得非常小,这将会导致板条晶体内部光损伤现象的出现。所以,实验系统设计了双负柱面镜结合特定倍数扩束望远镜系统的中继光路,用于补偿板条晶体热效应的影响,如图 5 所示。在设计光学补偿系统时,本着将系统像差尽量减小的原

则,除了根据模拟和实验测得的热焦距数值,还要考虑实际光路中激光发散角的影响。并且为防止放大后的激光脉冲损坏晶体,在各级放大板条之间加了扩束镜,以降低放大后激光光束的功率密度,同时考虑到衍射效应对光束质量的影响,进入放大器光斑截面尺寸一般小于晶体板条的横截面尺寸。

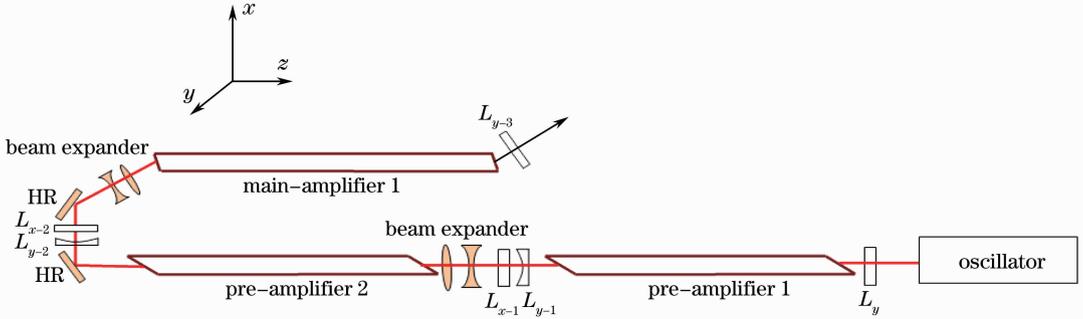


图 5 实验装置原理图( $L_x$  和  $L_y$  分别表示 zigzag 方向和垂直 zigzag 方向的负柱面镜)

Fig. 5 Optical schematic of the experimental system ( $L_x$  and  $L_y$  stand for negative cylindrical lens in the zigzag and perpendicular zigzag direction respectively)

实验系统对光束质量  $M_x^2 = 1.2, M_y^2 = 1.2$  的种子光进行三级放大,在重复频率为 250 Hz,三级放大单脉冲能量输出大于 537 mJ 时,输出激光的光束质量  $M_x^2 = 2.35, M_y^2 = 2.66$ 。利用 Spiricon LBA-300PCM2 测试系统测量光束质量,分别得到经过一级放大,二级放大,三级放大后的光束质量  $M^2$  的测量值为:1.36,1.70,2.35。图 6 给出了三级放大并进行热透镜补偿后的输出近场光斑和光束质量。近

场光斑近似平行光,说明设计的热透镜补偿系统是非常有效的,理论模型选取非常恰当;经过一级放大得到的光束质量为 1.36,与理论值 1.46 吻合良好,经过第二级放大和第三级放大后的光束质量实际测量值比理论计算值要小,这是由于经过多级放大后,相位畸变累积对光束质量的影响使得模拟计算的束腰位置和实验值有出入,因而使得计算值大于实际测量值。

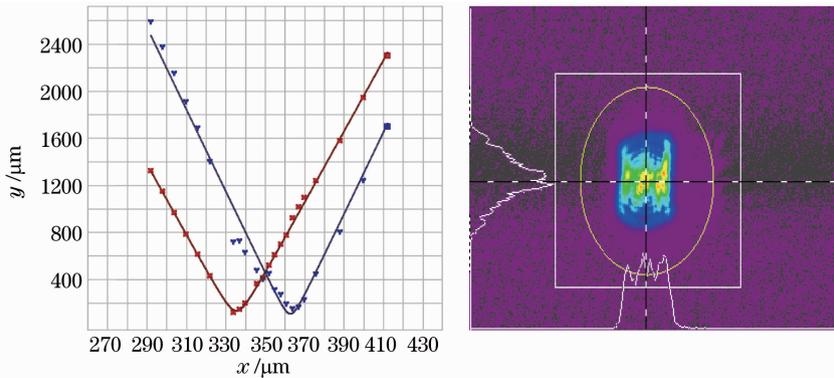


图 6 三级联调放大后输出激光的光束质量

Fig. 6 Beam quality of output laser after three stages modulation

## 4 结 论

对 Bounce 抽运板条放大器建立了热分析模型,采用有限元法得到板条放大器内的温度分布,然后用光线追迹法得出 zigzag 面内和垂直于 zigzag 面内的热焦距,利用二阶矩法计算得到经过板条放大后光束的光束质量。实验采用振荡级+三级

Bounce 抽运放大板条的结构,对每一放大级板条做热效应模拟和实验测量得出各级的热焦距,针对各级热焦距采用匹配的负透镜进行热效应补偿,最后获得重复频率 250 Hz,单脉冲能量 537 mJ,光束质量  $M_x^2 = 2.35, M_y^2 = 2.66$  的输出,放大器总的光-光转换效率达到 18%。

## 参 考 文 献

- 1 K. Tei, M. Kato, Y. Niwa *et al.*. Diode-pumped 250 W zigzag-slab Nd:YAG oscillator amplifier system[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(7): 514~516
- 2 F. E. Hovis, J. Edelman, T. Schum *et al.*. Recent progress on single frequency lasers for space and high altitude aircraft applications[C]. *SPIE*, 2008, **6871**: 68710E
- 3 Zhang Lingling, Meng Junqing, Huang Yan *et al.*. Recent advances in high power solid-state slab lasers[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(4): 33~37  
张玲玲, 孟俊清, 黄燕等. 高功率板条激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(4): 33~37
- 4 Narasimha S. Prasad, Upendra N. Singh *et al.*. High energy single-mode all-solid-state and tunable UV laser transmitter[C]. *SPIE*, 2006, **6214**: 62140T
- 5 Wang Jianlei, Li Lei, Qiao Liang *et al.*. Theoretical analysis of temperature and stress distribution in end-pumped composite ceramic Nd:YAG laser slab[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1777~1783  
王建磊, 李磊, 乔亮等. 端面抽运复合 Nd:YAG 陶瓷板条激光介质温度和应力分布的理论分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1777~1783
- 6 Huang Feng, Wang Yuefeng, Niu Yanxiong. Study on thermal effect of end-pumped high-repetition-rate Nd:YAG laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(4): 358~361  
黄峰, 汪岳峰, 牛燕雄. LD 端面泵浦的高重复 Nd:YAG 激光器的热效应研究[J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(4): 358~361
- 7 J. M. Eggleston, T. J. Kane, K. Kuhn *et al.*. The slab geometry laser-I; theory[J]. *IEEE J. Quantum. Electron.*, 1985, **20**(3): 289~300
- 8 T. J. Kane, J. M. Eggleston, R. L. Byer. The slab geometry laser-II; thermal effects in a finite slab[J]. *IEEE J. Quantum. Electron.*, 1985, **20**(8): 1195~1210
- 9 J. D. Foster, L. M. Osterink. Thermal effects in a Nd:YAG laser[J]. *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**: 3556~3663
- 10 A. K. Potemkin, E. A. Khazanov. Calculation of the laser-beam  $M^2$  factor by the method of moments [J]. *Quantum Electron.*, 2005, **35**(11): 1042~1044
- 11 Liu Dan, Xie Kedi, Ma Xiuhua *et al.*. Study of high-efficient conduction cooling technique for high power space-based all-solid-state lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0702016  
刘丹, 谢可迪, 马秀华等. 大功率空间全固态激光器高效传导冷却技术研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0702016
- 12 Kong Xiangqian. Thermal Stress Analysis of Finite Element Method (2nd Edition) [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1999. 18~20, 71  
孔祥谦. 热应力有限单元法分析(第二版)[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1999. 18~20, 71
- 13 Daryl L. Logan. A First Course in the Finite Element Method [M]. Wu Yisheng, Wu Yongli Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2003. 1~9, 20~43, 241~252, 359~388, 418~425  
达里尔洛根. 有限元方法基础教程[M]. 伍义生, 吴永礼译. 北京: 电子工业出版社, 2003. 1~9, 20~43, 241~252, 359~388, 418~425
- 14 Wang Chao, Tang Xiaojun, Xu Luangjing *et al.*. Investigation on thermal effect of high power slab laser with 11 kW[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2807~2809  
王超, 唐晓军, 徐鸾婧等. 输出功率 11 kW 的高功率固体板条激光器介质热分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2807~2809
- 15 Jianlei Wang, Liang Yin, Xiangchun Shi *et al.*. Theoretical analysis of amplification performance of space-based lasers with different pump configurations[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(6): 591~594
- 16 Yin Liang, Ma Xiuhua, Lu Tingting *et al.*. Conductively-cooled and bounce-pumped all-solid-state double-stage slab laser amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2340~2345  
尹亮, 马秀华, 陆婷婷等. 传导冷却反弹抽运结构的板条激光放大器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2340~2345

栏目编辑:宋梅梅