

# 结构紧凑型激光二极管侧面抽运多通 Nd:YVO<sub>4</sub>板条激光放大器

孙 哲 陈 欣 姜梦华 惠勇凌 雷 旬 李 强

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 报道了一种高效率、结构紧凑型的激光二极管(LD)侧面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>板条激光放大器。主振荡器为被动调 Q 微片激光器,在重复频率为 20 kHz 时,种子激光为平均功率为 0.5 W,脉冲宽度为 2.371 ns 的基模激光。为了匹配抽运光模体积,实现高的能量提取效率和高增益放大,并减小热透镜效应,设计了一种分别对抽运光和种子激光进行整形的激光放大器。采用柱透镜对 LD 单 bar 发射的抽运光进行整形,同时采用焦距为 75 mm 的球透镜组对一通放大种子激光进行压缩;采用焦距为 60 mm 的柱透镜组对二通和三通放大种子激光进行压缩,以匹配抽运光的模体积。在重复频率为 20 kHz 时,实现了平均功率为 5.5 W,脉冲宽度为 2.5 ns,光束质量因子  $M^2$  为 1.5 的激光输出,能量提取效率大于 14%。

**关键词** 激光器;多通放大;板条结构;Nd:YVO<sub>4</sub>

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0602018

## Compact Laser Diode Side-Pumped Multipass Nd:YVO<sub>4</sub> Slab Laser Amplifier

Sun Zhe Chen Xin Jiang Menghua Hui Yongling Lei Hong Li Qiang

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** A compact laser diode side-pumped multipass Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser amplifier is reported. The master oscillator is a passively Q-switched microchip laser, and the seed laser with average power of 0.5 W and pulse duration of 2.371 ns is obtained in TEM<sub>00</sub> mode when the repetition frequency is 20 kHz. In order to achieve high efficiency and high gain amplification output, we design a compact structure to collimate the pump laser and the seed laser. In order to optimize the energy extraction and reduce the thermal aberrations, the pump laser is collimated by a cylindrical microlens in the vertical direction. In order to match the horizontal gain diameter, the spherical lenses ( $f=75$  mm) are used to focus the laser into the slab in the first pass, and the cylindrical lenses ( $f=60$  mm) are used to focus the laser into the slab in the second and the third passes. After three-pass amplification, average output power of 5.5 W, pulse duration of 2.52 ns and  $M^2$  of 1.5 are achieved when the repetition frequency is 20 kHz, and the corresponding energy extraction efficiency is greater than 14%.

**Key words** lasers; multipass amplification; slab structure; Nd:YVO<sub>4</sub>

**OCIS codes** 140.3280; 140.3460; 140.3540

## 1 引 言

高峰值功率、高重复频率和纳秒脉宽的全固态微型激光器已经广泛应用于激光打标、激光微加工、激光测距和激光雷达等领域。其中重复频率达数十千赫兹的高重频脉冲激光器,更是信息采集中的高分辨率和高精度的有效保证<sup>[1~4]</sup>。

纳秒脉宽全固态激光器通常采用主动调 Q 方式产生,虽然这种方式可以实现高峰值功率输出,但

会使激光器的结构复杂,体积变大。另一种方式是采用被动调 Q 微片激光器作为主振荡器,通过结构紧凑的激光放大器放大后,获得高峰值功率和高重复频率的纳秒脉宽激光输出。这种结构的优势在于,被动调 Q 微片激光器结构简单紧凑,很容易实现纳秒脉宽、重复频率为千赫兹以上的激光输出。同时,采用激光放大器放大后,可以实现高峰值功率。因此,设计一种成本低廉且结构紧凑的激光放

收稿日期: 2013-02-26; 收到修改稿日期: 2013-04-03

作者简介: 孙 哲(1986—),男,博士研究生,主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail: allen-sun@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 李 强(1965—),男,博士,教授,主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail: ncltlq@bjut.edu.cn

大器是十分重要的。

近年来,国内外针对窄脉宽的多通放大器已经有了一定的研究。Nawata 等<sup>[5]</sup>设计了一种相位共轭结构的 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光放大器,在重复频率为 0.33~1.0 MHz 时,实现了峰值功率为 2.8~6.8 MW 的输出,脉宽为 7.6 ps,能量提取效率为 34%~35%。Agnesi 等<sup>[6]</sup>设计了一种亚纳秒脉宽、重复频率为 10 kHz 的半导体主振荡功率放大(MOPA)系统,其中激光放大器部分采用 Nd:YVO<sub>4</sub> 梯形板条双通放大结构,实现了平均功率为 5.45 W,脉宽为 577 ps 的激光输出,能量提取效率为 13%。石鹏等<sup>[7~9]</sup>设计了一种混合腔多通板条激光放大器,该结构的激光放大器能够实现对连续和脉冲种子激光的高功率、高效率及高光束质量放大。尹亮等<sup>[10]</sup>理论和实验研究了反弹抽运结构板条激光放大器,主振荡器输出平均功率为 1.1 W,脉宽为 11.3 ns,重复频率为 125 Hz 的单频激光,放大后平均功率为 24.1 W,脉宽为 8.9 ns。李环环等<sup>[11]</sup>对反弹抽运结构板条激光放大器的热补偿进行了仿真和实验验证。王超等<sup>[12]</sup>同样针对高功率反弹抽运结构板条激光器进行了热分析。陆丹等<sup>[13]</sup>设计了一种激光二极管(LD)抽运的主振荡级与功率放大器结构 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器,激光放大器采用具有近共焦、非稳腔特点的折叠光路结构,在连续工作条件下,主振荡级以 6.1 W 注入放大器,获得了最大 26.8 W 的放大输出功率。

本文报道了一种用于脉宽为 2.3 ns 和重复频率为 1~20 kHz 可调的,20 kHz 时平均功率为 0.5 W 被动调 Q 主振荡器的高效率、结构紧凑型 LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条晶体三通放大器,实现了平均功率为

5.5 W,脉宽为 2.5 ns,光束质量因子  $M^2$  为 1.5 的激光输出。

## 2 激光放大器实验装置

实验装置如图 1 所示,主振荡器采用实验室自主研发的高稳定性 Cr<sup>4+</sup>:YAG/Nd:YAG 被动调 Q 激光器,使用单管 LD 抽运,在 20 kHz 时,获得了平均功率为 0.5 W,脉冲宽度为 2.3 ns,重复频率为 1~20 kHz 可调的基模激光输出。激光放大器增益介质选择了与 Nd:YAG 晶体发射波长匹配,发射截面大、偏振输出的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体板条沿  $a$  轴切割,掺杂原子数分数为 1.0%,尺寸为 3 mm×4 mm×12 mm,板条为梯形,两侧切角为 13°,并且镀 1064 nm 增透膜,下底面(3 mm×12 mm)镀 808 nm 增透膜,上底面(3 mm×10.6 mm)镀 808 nm 全反(HR)膜。上下两个大面(4 mm×12 mm)镀银,采用通水铜热沉冷却。激光放大器采用 40 W,808 nm LD bar 条侧面抽运,抽运偏振方向沿  $c$  轴方向。由于主振荡器重复频率在 1~20 kHz 可调,在 20 kHz 时,对应的脉冲间隔时间为 50  $\mu$ s,而 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的上能级寿命约为 100  $\mu$ s,因此采用了连续抽运 LD bar 条。使用微柱透镜沿快轴方向聚焦抽运光,使抽运增益区域的厚度约为 300  $\mu$ m。抽运增益区域的深度由 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的吸收系数决定,约为 1 mm。为了提高种子激光单脉冲能量密度、能量提取效率和放大的增益,减小热畸变和热透镜效应,保证种子激光和抽运光的模式匹配,实验中种子激光采取大入射角掠入射,同时采用聚焦透镜对种子激光进行聚焦,使种子激光束腰位于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体底面中心。

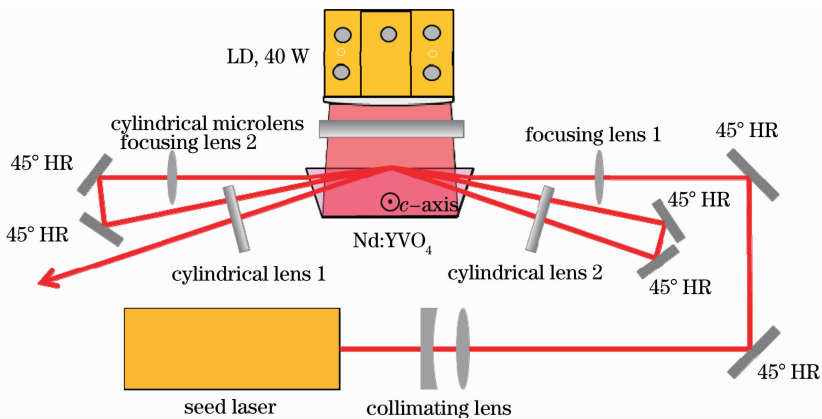


图 1 板条激光放大器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of slab laser amplifier

### 3 激光放大器结构分析及实验结果

实验采用的 LD 单 bar, 在快轴方向的发光区尺寸为 1 μm, 快轴方向发散角为 35°。使用光参数乘积(BPP)来衡量半导体激光器的光束质量, 根据光参数积定义可知<sup>[14]</sup>,

$$K_{BPP} = \omega_0 \theta_0, \quad (1)$$

式中  $\omega_0$  为光斑束腰半径,  $\theta_0$  为远场发散角(半角)。

为了保证抽运光在快轴方向上的增益区域约为 300 μm, 根据(1)式计算可以得到, 经过微柱面镜整形后的光束发散角约为 0.116°。因此, 在保证 LD 单 bar 到微柱面镜有足够调整空间的情况下, 可以计算得到微柱面镜的焦距应小于 15 mm。实验中, 采用了焦距为 13.6 mm 的微柱面镜对抽运光进行整形, 微柱面镜中心到晶体端面约为 14 mm, 保证晶体内增益区域为抽运光束腰位置, 使种子激光更好地匹配抽运光的模体积。由于抽运光偏振方向沿掺杂原子数分数 1.0% 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 c 轴方向, 吸收系数约 28 cm<sup>-1</sup>, 因此有效增益长度约为 1 mm。

一通放大时, 经准直后的种子激光沿 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体下表面入射, 靠近抽运光, 入射角度为 0°, 光斑直径约为 900 μm, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体两侧切角为 13°。由于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体下表面长度为 12 mm, 因此需要保证种子激光聚焦的束腰长度大于 12 mm。实验采用一对焦距  $f=75$  mm 的透镜聚焦, 种子激光束腰在厚度方向上约为 250 μm, 束腰长度约为 15 mm。种子激光经过折射后, 在下底面发生内全反射。由于在厚度方向上的抽运区域约为 300 μm, 因此厚度方向上的热透镜效应可以忽略。采用内全反射式的通过放大结构, 沿抽运方向上的热透镜效应可以得到补偿。因此, 聚焦透镜在起到对种子光聚焦的作用的同时, 在一定程度上也起到了像传递的作用, 减少了光束在传播过程中的畸变。

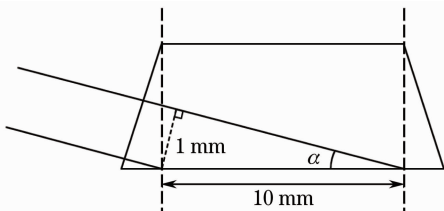


图 2 Nd:YVO<sub>4</sub>板条晶体二通激光入射角度

Fig. 2 Incident angle of 2nd pass laser in Nd:YVO<sub>4</sub> slab

二通和三通放大采用内全反射结构, 通过一对柱面镜来实现对种子激光的压缩。柱透镜只在平行于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 c 轴方向上对种子激光进行压缩, 在匹配了抽运增益模体积的同时, 增大了种子激光

模体积, 可以实现更高增益的放大。因此, 为保证 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体下表面的有限尺寸产生衍射, 同时保证种子光完全匹配抽运增益区域, 经计算种子激光入射角度  $\alpha \approx 6^\circ$ , 如图 2 所示。种子激光经过放大后, 在功率提高的同时光斑直径也被略微放大, 但是种子激光入射角度逐渐增大, 因此可以保证种子激光不会因 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体下表面的有限尺寸产生衍射。由于有效抽运增益区域的深度约为 1 mm, 通过计算可知, 对于二通放大激光, 需要保证束腰长度大于 10.05 mm。通过使用两个 45° 的 1064 nm 激光全反镜, 使二通激光再次进入 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体实现三通放大。为了简化激光放大器结构, 只采用了一对柱面镜分别对二通和三通放大激光进行压缩, 为了使束腰长度仍能够匹配抽运增益区域, 经计算, 当二通和三通种子激光夹角保持约 2° 时, 三通放大的束腰长度需要大于 10.1 mm, 这与二通放大时对束腰的要求几乎相同。实验中, 采用一对焦距  $f=60$  mm 的柱面镜来实现聚焦。对种子激光进行聚焦后, 使束腰在厚度方向上仍保持在 250 μm 左右。

如图 3 所示, 重复频率为 20 kHz 时, 三通放大最大输出功率大于 5.4 W。从图中可以看出, 三通放大输出激光功率的增益小于二通放大的增益, 由于二通和三通放大时, 采用了柱透镜对种子激光进行聚焦, 为了保证输出光斑的形状, 需要略微调整柱透镜 2 的位置。在三通放大时, 束腰位置并未匹配到最佳的抽运增益区域, 因此造成三通放大增益小于二通放大增益。同时, 为了匹配好三通放大时的抽运光与种子激光, 抽运光增益区域应略大于种子激光束腰宽度, 因此在一定程度上牺牲了一通放大的增益。但是由于种子激光的单脉冲能量是几十微

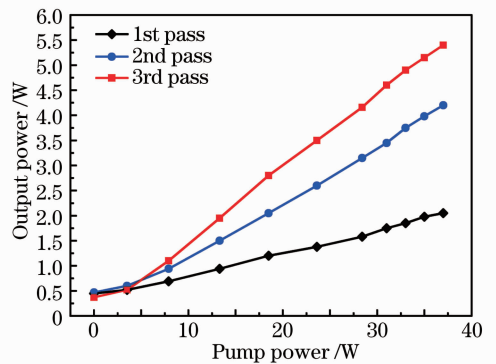


图 3 Nd:YVO<sub>4</sub>板条激光放大器在重复频率为 20 kHz 时一通, 二通和三通放大输出功率随抽运功率的变化

Fig. 3 1st-, 2nd- and 3rd-pass output power versus pump power with repetition frequency of 20 kHz of the Nd:YVO<sub>4</sub> slab amplifier

焦量级,属于小信号放大,增益很低,所以对最后放大的总增益影响不大。

主振荡器的重复频率在 5~20 kHz 范围内取不同值的,激光放大器的三通放大输出功率如图 4 所示。当重复频率为 20 kHz 时,单脉冲能量为 275  $\mu\text{J}$ ,此时放大效率最高,能量提取效率大于 14%。

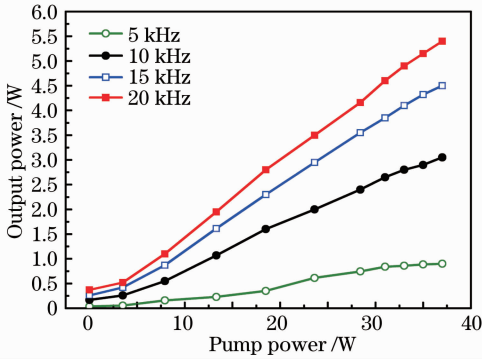


图 4 不同重复频率下 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光放大器三通放大输出功率

Fig. 4 3rd-pass output power versus pump power with different repetition frequencies of the Nd:YVO<sub>4</sub> slab amplifier

图 5 为使用 Tektronix 公司生产的示波器 (1 GHz) 测试激光脉冲,在重复频率为 20 kHz 时,图 5(a)、(b) 显示了主振荡器输出的单脉冲激光和稳定的激光序列,脉冲宽度约为 2.371 ns。图 5 (c)、(d) 显示了激光放大器输出的单脉冲激光和稳定的激光序列,脉冲宽度略微展宽,约为 2.52 ns。可以看出,主振荡器输出的种子激光经过 Nd:YVO<sub>4</sub>

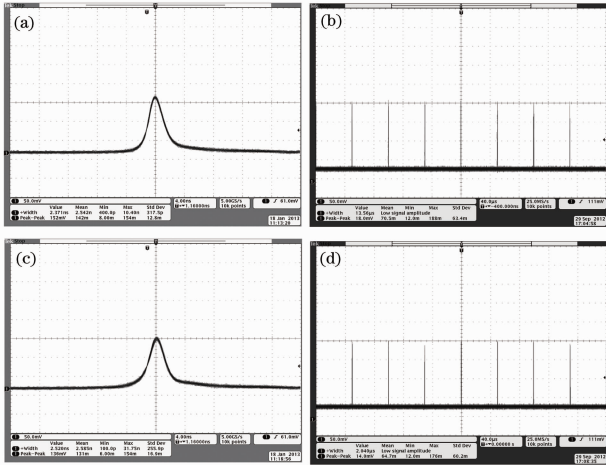


图 5 主振荡器输出的 (a) 单脉冲和 (b) 脉冲序列; 激光放大器输出的 (c) 单脉冲和 (d) 脉冲序列

Fig. 5 (a) Output single pulse and (b) pulse train of master oscillator; (c) output single pulse and (d) pulse train of laser amplifier

激光放大器后,输出了稳定的放大激光。测试了重复频率为 1~20 kHz 时主振荡器和放大器的输出波形,与 20 kHz 时的输出波形差别较大,但同样能够实现稳定的放大激光输出。使用刀口法测试主振荡功率放大系统的光束质量,在重复频率为 20 kHz,功率输出最大时,测得光束质量因子  $M^2 \approx 1.5$ ,测量结果和光斑形状如图 6 所示。

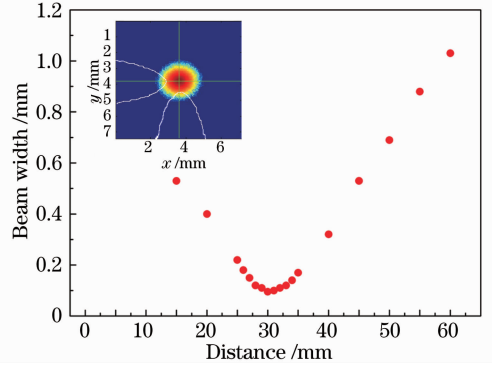


图 6 放大激光光斑形状及光斑大小测量

Fig. 6 Beam shape of amplifier laser and the measured beam widths

## 4 结 论

报道了一种高效率结构紧凑型半导体抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 板条激光放大器, Cr<sup>4+</sup>:YAG/Nd:YAG 被动调 Q 主振荡器重复频率为 1~20 kHz 可调,在 20 kHz 时,获得了平均功率为 0.5 W,脉宽为 2.371 ns 的基模种子激光,经过三通放大后,获得了平均功率为 5.5 W,单脉冲能量为 275  $\mu\text{J}$  的激光输出,激光放大器能量提取效率大于 14%,光束质量因子  $M^2 \approx 1.5$ ,脉冲宽度约为 2.5 ns。若进一步增加多通放大次数,或者增加放大级数,这种结构的激光放大器能够实现纳秒脉宽、毫焦量级的脉冲输出。

## 参 考 文 献

- 1 P. Cerny, H. Jelinkova, P. G. Zverev *et al.*. Solid state lasers with Raman frequency conversion[J] *Prog. Quantum Electron.*, 2004, **28**(2): 113~143
- 2 M. Ostermeyer, P. Kappe, R. Menzel *et al.*. Diode-pumped Nd:YAG master oscillator power amplifier with high pulse energy, excellent beam quality, and frequency-stabilized master oscillator as a basis for a next-generation lidar system[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(4): 582~590
- 3 D. Hwang, S. G. Ryu, N. Misra *et al.*. Nanoscale laser processing and diagnostics[J]. *Appl. Phys. A*, 2009, **96**(2): 289~306
- 4 J. Brandt, T. D. Steiner, W. J. Mandeville *et al.*. Long-range imaging lidar flight test[C]. *SPIE*, 1995, **2472**: 114~118
- 5 K. Nawata, M. Okida, K. Furuki *et al.*. MW ps pulse generation at sub-MHz repetition rates from a phase conjugate

- Nd:YVO<sub>4</sub> bounce amplifier[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(15): 9123~9128
- 6 A. Agnesi, P. Dallochio, F. Pirzio *et al.*. Sub-nanosecond single-frequency 10-kHz diode-pumped MOPA laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2010, **98**(4): 737~741
- 7 Shi Peng, Zhang Hengli, Wang Yongdong *et al.*. High repetition rate electro-optically Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser with high beam quality output[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 641~644
- 石 鹏, 张恒利, 汪永东等. 高重复率电光调 Q 的高光束质量 Nd:YVO<sub>4</sub>板条激光器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 641~644
- 8 Ma Zhe, Li Daijun, Shi Peng *et al.*. Compact multipass Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser amplifier based on a hybrid resonator[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2007, **24**(5): 1061~1065
- 9 Shi Peng, Li Daijun, Zhang Hengli *et al.*. High power partially end-pumped slab laser with hybrid resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 491~494
- 石 鹏, 李代军, 张恒利等. 大功率部分端面抽运混合腔板条激光器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 491~494
- 10 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
- 11 Li Huanhuan, Li Shiguang, Ma Xiuhua *et al.*. Modeling and experimental study at thermal effect of high power bounce-pumped slab amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0302008
- 李环环, 李世光, 马秀华等. 高功率 Bounce 板条放大器链路热补偿仿真及实验[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0302008
- 12 Wang Chao, Tang Xiaojun, Xu Liuqing *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, 徐臻婧等. 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
- 13 Lu Dan, Huang Lei, Wang Qi *et al.*. Laser diode pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser in master oscillator and power amplifier structure[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **37**(10): 1338~1342
- 陆 丹, 黄 磊, 王 琦等. 激光二极管抽运的主振荡级与功率放大器结构 Nd:YVO<sub>4</sub>激光器[J]. *中国激光*, 2007, **37**(10): 1338~1342
- 14 Zuo Tiechuan. Laser Beam Quality, Transmission Quality and Focus Quality in Manufacture[M]. Beijing: Science Press, 2008. 14~15
- 左铁钊. 制造用激光光束质量、传输质量与聚焦质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 14~15

栏目编辑：张 腾