

文章编号: 0258-7025(2010)12-2949-05

带固体相位共轭镜的全固态脉冲抽运高重复频率 大能量单纵模 MOPA 激光器

赵智刚¹ 崔玲玲² 童立新² 高清松² 唐淳² 刘崇^{1*} 陈军¹

(¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)
(² 中国工程物理研究院应用电子技术研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 使用脉冲激光二极管抽运的单纵模激光器作为种子源,通过两级预放大器和两级主放大器的单通放大,得到重复频率 400 Hz,单脉冲能量 36.5 mJ,脉宽 24 ns 的单纵模激光输出,且输出光束质量为 $M_x^2=1.78, M_y^2=2.13$ 。应用大口径锥度熔融石英光纤作为相位共轭镜,获得了大于 50% 的受激布里渊散射反射率,入射激光被压缩到 6 ns 左右,大幅提升了脉冲峰值功率;由于相位共轭特性,反射回的激光将沿原路返回再次通过主放大器,补偿了激光晶体中的相位畸变,并再次提取晶体中的能量进行有效放大。双通后输出重复频率 400 Hz,单脉冲能量 101.25 mJ,脉冲宽度 6 ns 左右的单纵模激光,峰值功率可高达 16.8 MW,光束质量因子为 $M_x^2=1.74, M_y^2=1.93$ 。可见,在应用该相位共轭镜双通过后,光束质量并没有继续恶化,而是有所提升;使用平面镜双通后的光束质量因子 $M^2 \approx 4$,从而有效证实了该光纤相位共轭镜补偿畸变的作用。

关键词 激光器;主振荡功率放大器;单纵模;全固态;相位共轭镜;锥度光纤

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103712.2949

All-Solid-State High Pulse Repetition Rate High Pulse Energy Single-Longitudinal-Mode MOPA Laser System with Solid-State Phase Conjugating Mirror

Zhao Zhigang¹ Cui Lingling² Tong Lixin² Gao Qingsong² Tang Chun² Liu Chong¹ Chen Jun¹

(¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)
(² Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract The output laser beam from a pulsed diodes side pumped single longitudinal mode laser is amplified by single passing through two pre-amplifiers and two main amplifiers, by which single longitudinal mode laser with pulse energy of 36.5 mJ, pulse width of 24 ns at 400 Hz repetition rate is obtained, with beam quality factor being $M_x^2=1.78, M_y^2=2.13$. After applying a large aperture tapered fused silica fiber as phase conjugating mirror, which shows more than 50% stimulated Brillouin scattering reflectivity, the input laser pulse width can be reduced to 6 ns and peak power increased significantly. The returned laser backtracks because of the phase conjugation characteristics and passes through two main amplifiers again, not only compensating the phase aberration of the laser amplifier crystal but also distilling more energy and amplifying the laser effectively. Finally, single longitudinal mode laser with pulse energy of 101.25 mJ, pulse width of 6 ns at 400 Hz repetition rate is achieved, corresponding to a peak power of 16.8 MW. Its beam quality factor is $M_x^2=1.74, M_y^2=1.93$. Obviously, the beam quality is improved instead of deteriorated after applying the phase conjugation mirror. However, the beam quality deteriorates to $M^2 \approx 4$ by using plane high reflective (HR) mirror, which validates the effectiveness of the phase conjugation mirror.

Key words lasers; master oscillator power amplifier; single-longitudinal-mode; all solid state; phase conjugating mirror; tapered fiber

收稿日期: 2010-06-04; 收到修改稿日期: 2010-07-07

基金项目: 浙江省重大科技专项项目(2009C14036)资助课题。

作者简介: 赵智刚(1984—),男,博士研究生,主要从事激光与非线性光学方面的研究。E-mail: zzg4298@163.com

导师简介: 陈军(1946—),女,教授,博士生导师,主要从事激光与非线性光学方面的研究。E-mail: chenjun1@zju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: chongliu78@hotmail.com

1 引 言

高重复频率大能量单纵模激光器具有窄线宽、光滑的空间和时间波形,且能量集中、相干性好,在激光雷达、激光遥感、光谱学、量子光学、光学测量、光频标准和非线性光学频率变换等领域中都具有广泛的应用,可作为各种科学研究工作非常有用的光源^[1~3]。受激布里渊散射(SBS)自从被证明可以矫正激光波前畸变以后,就不断地被人们用作相位共轭镜来改善激光光束质量,带有SBS相位共轭镜的双程主振荡功率放大(MOPA)激光系统是一种在不牺牲激光光束质量的前提下提升激光输出功率的有效手段^[4~6]。

目前,已有的基于SBS相位共轭镜的高重复频率大能量MOPA激光系统大多是基于液体相位共轭镜或者气体相位共轭镜^[7~10]。虽然液体和气体相位共轭镜可以有较高的SBS反射率,并且发展也较为成熟,但是在实际应用中,却有种种不便。对于气体介质,必须采用高压来提高其密度和相应的SBS增益作用;对于液体介质,由于其纯度对击穿阈值和相位共轭度有一定的影响,因此使用之前最好进行提纯,并且还会有一定的毒性。因此,寻找高增益、高稳定性的固体SBS介质,探索提高固体相位共轭镜负载能力的方法,建立高效、安全、结构紧凑和操作方便的相位共轭系统,实现全固化的带相位共轭镜的MOPA激光系统就显得有更加重要的实际意义。到目前为止,国内外已有一些基于固体相位共轭镜的MOPA激光系统的报道^[11~17]。2001年,T. Riesbeck等^[11]报道了基于商用光纤的带固体相位共轭镜的双极并行MOPA激光系统,平均输出功率达315 W,光束质量因子 $M^2=2.6$,但其振荡器为闪光灯抽运、被动调Q的Nd:YAP激光器,导致输出的重复频率为100 Hz大脉冲包络下还有20个小脉冲。2004年,周涛等^[12]报道了利用多模光纤作为相位共轭镜应用于重复频率100 Hz,脉宽20 ns的电光调Q四通放大激光二极管(LD)抽运激光器的实验研究,但最终仅获得4.1 mJ的双通输出能量。之后,周涛等^[13,14]又报道了基于锥度光纤相位共轭镜的双通MOPA激光系统,最终获得了大于21 mJ,脉冲宽度为17 ns的双通输出能量,峰值功率为1.2 MW。2007年,汪莎等^[15~17]报道了一种熔石英棒和光纤构成的新型复合型相位共轭镜,在重复频率为100 Hz时SBS反射率达到42.05%,并将其应用于双程放大系统,最终输出了单脉冲能量188 mJ,脉宽32 ns的激光输出,但峰值功率也仅为5.9 MW;而在400 Hz条件

下,最大反射率仅能达到11.6%,因此极大地限制了其在高重复频率条件下的应用。可见,上述的基于固体SBS相位共轭镜的MOPA激光系统无论是在重复频率还是在峰值功率方面均不尽如人意。

本文是在童立新等^[18]对400~1000 Hz高重复频率下大口径锥度光纤相位共轭镜的特性研究基础上,对400 Hz重复频率下,带固体相位共轭镜的全固态大能量单纵模MOPA激光器进行的深入研究。使用脉冲激光二极管抽运的重复频率达400 Hz的Nd:YAG激光器作为种子源,并使用两级预放大器 and 两级主放大器对其先进行单通放大。为了补偿激光晶体中的畸变并有效地提取主放大器中存储的能量,在放大器之后加入特殊设计的大口径锥度光纤相位共轭镜使单通输出的放大激光再次通过主放大器进行双程放大,最终获得重复频率为400 Hz,单脉冲能量101.25 mJ,脉冲宽度为6 ns左右的单纵模激光输出,输出脉冲光滑没有调制,对应的单脉冲峰值功率高达16.8 MW,光束质量因子 $M^2<2$ 。

2 实验装置

图1为实验装置中所使用的种子激光器示意图。该种子激光器为一台由脉冲激光二极管侧面抽运的电光调Q单纵模Nd:YAG激光器,在脉冲重复频率为400 Hz时,输出功率为0.5 W,光束质量因子 $M^2<1.1$ 。图2为该种子激光器输出激光脉冲的时间波形,脉冲宽度24 ns左右。可以看出,其时间波形相当光滑,没有出现激光器多纵模运转时的拍频现象,表明激光器处于单纵模状态运转。激光脉冲是使用带宽大于7.5 GHz的超快光电探测器(Alphas UPD-40-UVIR-P)探测并由泰克公司的带宽为1 GHz的示波器(Tektronix DPO7104)显示的。

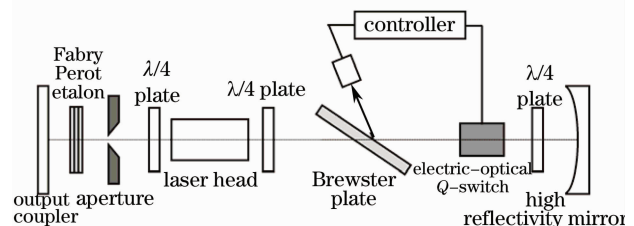


图1 单纵模激光器内部示意图

Fig. 1 Schematic diagram for the inside of the single-longitudinal-mode laser

如图3所示,从种子激光器出射的单纵模激光依次通过扩束装置和光学隔离器系统I进入两级预放大器进行预放大。其中光学隔离器系统是由两个

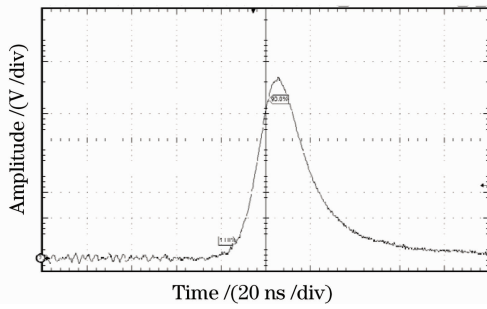


图 2 单纵模激光器输出的典型脉冲波形

Fig. 2 Typical pulse emitted by the single-longitudinal-mode laser

对称放置的薄膜偏振片 (Brewster plate, BP), 45° 的法拉第旋光器和快轴 22.5° 放置的 $\lambda/2$ 波片组成的, 用以实现预放大器和主振荡器之间的有效隔离, 避免损坏主振荡器。预放大器为两个峰值抽运功率可达 700 W 的激光二极管侧面抽运的 Nd:YAG 抽运头。为与主振荡器配合, 将预放大器工作频率也选择为 400 Hz 并对抽运脉冲选取合适的时间延迟。从 BP-1 反射出的部分种子光被光电二极管探测, 并显示在示波器上进行实时监测, 如果脉冲形状光滑, 则表明此时为单纵模运转; 如果脉冲出现调制结构, 也即多纵模拍频, 则表示多纵模运转。

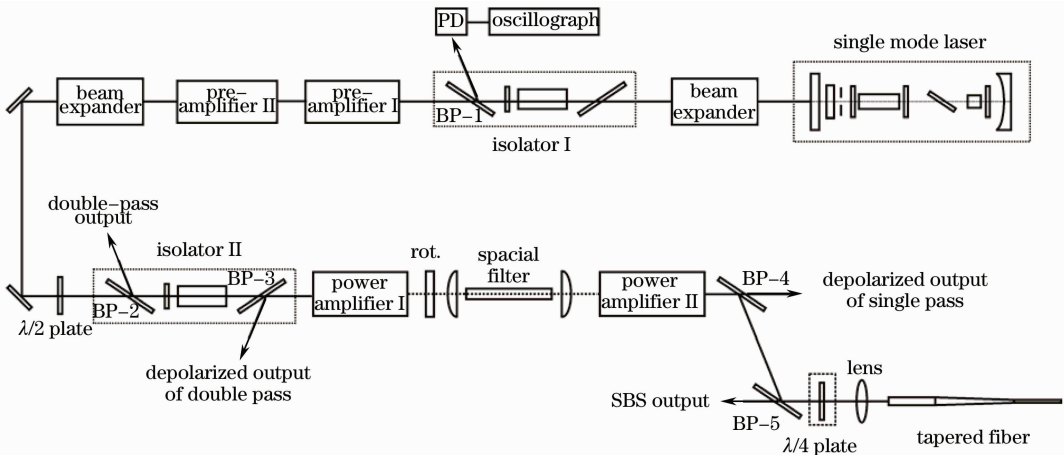


图 3 实验装置原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup

从预放大器输出的光束经由两个透镜组成的光束扩束系统耦合进入主放大器进行进一步放大。在扩束系统和主放大器之间, 插入 $\lambda/2$ 波片和光学隔离系统 II。其中 $\lambda/2$ 波片用以调节从预放大器出射进入主放大器的功率, 进而控制主放大器单通之后的输出功率, 也即进入锥度光纤相位共轭镜的功率; 光学隔离系统 II 则用以控制预放大器与主放大器之间的隔离。与预放大器相似, 两个主放大器也均采用脉冲激光二极管侧面抽运 Nd:YAG 晶体的抽运头, 峰值抽运功率为 2400 W, 并同样将工作频率固定在 400 Hz 且对抽运脉冲选择合适的时间延迟。为了有效地消除主放大器中 Nd:YAG 的退偏效应, 在两个主放大器之间加入 90° 石英旋光器 (rot.) 和 $4f$ 成像系统对其进行补偿。

从主放大器输出的光束经过 BP-4 和 BP-5 之后经由 $\lambda/4$ 波片和长焦距透镜会聚进入锥度光纤, 锥度光纤前端面直径为 1 mm, 后端面直径为 $400 \mu\text{m}$ 。当入射光的功率密度达到 SBS 阈值之后, SBS 发生。如图 3 所示, 如果在 BP-5 之后插入 $\lambda/4$

波片, 由于两次通过该 $\lambda/4$ 波片, 返回的 SBS 反射光偏振态发生改变, 透过 BP-5, 便可以方便地测量 SBS 反射功率及反射率; 如果没有 $\lambda/4$ 波片, 则返回的 SBS 反射光偏振态不发生改变, 并由于相位共轭特性而沿原路返回再次进入主放大器提取能量, 获得放大。双通放大的激光将从 BP-2 处输出, 而退偏分量则从 BP-3 处输出。

3 实验结果及分析

在脉冲重复频率为 400 Hz 时, 从单纵模振荡器输出的功率为 0.5 W, 脉冲宽度 24 ns。之后, 通过扩束耦合系统进入两级预放大器进行放大。通过旋转 BP-2 之前的 $\lambda/2$ 波片, 预放之后的激光束进入主放大器的功率可以被连续调节。图 4 给出了单次和两次通过主放大器之后的单脉冲能量随入射单脉冲能量的变化关系。单通情况下, 在入射能量为 3.6 mJ 时, 获得最大单通输出能量为 36.5 mJ; 双通之后输出的单脉冲能量, 在单通输出 36.5 mJ 时, 得

到的最高脉冲输出能量为 101.25 mJ, 脉冲宽度和形状与入射之前相比并没有明显的变化, 脉冲宽度为 6 ns 左右, 脉冲上升沿小于 2 ns, 单纵模特性很好。因此, 单脉冲峰值功率可达 16.8 MW。这得益于双通提取更多能量以及相位共轭镜压缩脉冲的特性。

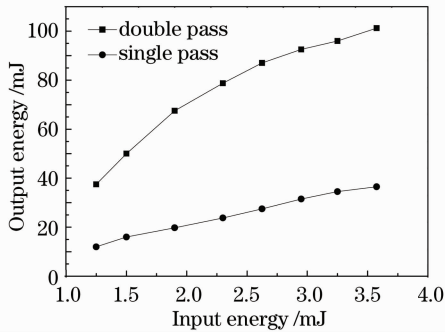


图4 重复频率为 400 Hz 时, 单通能量和应用锥度光纤相位共轭镜后的双通能量随注入能量的变化情况

Fig. 4 Single and tapered fiber conjugating mirror based double pass output energy versus input energy entered in the power amplifier at pulse repetition rate of 400 Hz

实验中测量所得的锥度光纤 SBS 反射率随入射脉冲能量的变化关系如图 5 所示。可见其反射率是随着入射脉冲能量的增大而不断增大的, 并且在注入能量为 36.5 mJ 时, 其最大反射率可达 50.7%。返回的 SBS 脉冲宽度被压缩到 6 ns 左右, 如图 6 所示。脉冲形状仍然十分光滑, 显示出其很好的单纵模特性, 且脉冲压缩比达到 1:4, 这对于提高单脉冲的峰值功率具有重要意义。相对于之前工作中所使用的锥度光纤相位共轭镜^[13,14], 这里锥度光纤相位共轭镜在更高重复频率、更大单脉冲能量条件下具有更高的反射率, 这是由于直径为 1 mm 的光纤入射端面 and 直径为 400 μm 光纤出射端面基本上会同时达到光纤端面的损伤, 这样就不会因前后两个光纤端面的可承受的功率范围不同而影响整个光纤可工作的区域。

使用 Spiricon 公司的 M^2 -200 光束质量分析仪对单通输出光束以及应用相位共轭镜以后双通输出光束的空间分布和光束质量进行测量, 测量结果如图 7 所示。由预放大器输出光束的光束质量因子测量结果为 $M^2 = 1.3$, 在经过主放大器后单通输出光束的光束质量因子测量结果为 $M_x^2 = 1.78$, $M_y^2 = 2.13$, 而应用相位共轭镜后双通输出光束的光束质

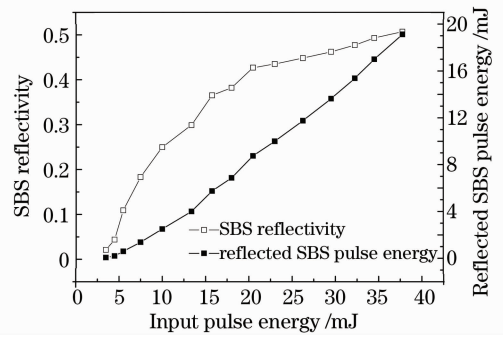


图5 重复频率为 400 Hz 时, 锥度光纤相位共轭镜反射能量及反射率随注入能量的变化情况

Fig. 5 Reflected SBS energy and SBS reflectivity of the tapered fiber conjugating mirror versus input energy at pulse repetition rate of 400 Hz

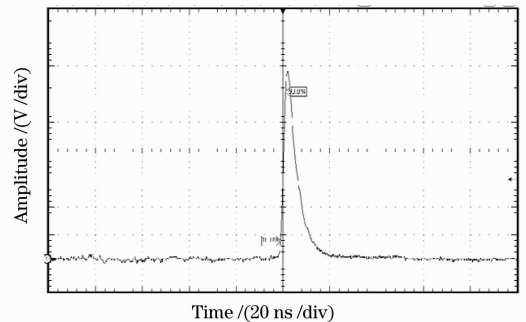


图6 重复频率为 400 Hz 时, SBS 反射脉冲的宽度
Fig. 6 Pulse width of the reflected SBS light at pulse repetition rate of 400 Hz

量因子为 $M_x^2 = 1.74$, $M_y^2 = 1.93$ 。因此, 在应用了相位共轭镜之后, 双通输出光束的光束质量有所改善; 另外, 如果将相位共轭镜用全反镜代替, 则双通输出光束的光束质量因子为 $M^2 \approx 4$, 更加证实了该固体相位共轭镜有效改善光束质量的特性。

4 结 论

利用搭建的基于固体 SBS 相位共轭镜的全固态高重复频率大能量单纵模 MOPA 激光系统, 应用大口径融石英锥度光纤作为相位共轭镜, 在重复频率 400 Hz 时获得了超过 50% 的反射率。将其应用于双通放大系统, 最终在重复频率 400 Hz 时获得了单脉冲能量 101.25 mJ, 脉冲宽度为 6 ns 的单纵模激光脉冲输出, 相应的单脉冲峰值功率高达 16.8 MW。通过双通的相位共轭特性, 获得了很好的光束质量, 输出激光的光束质量因子 $M^2 < 2$ 。

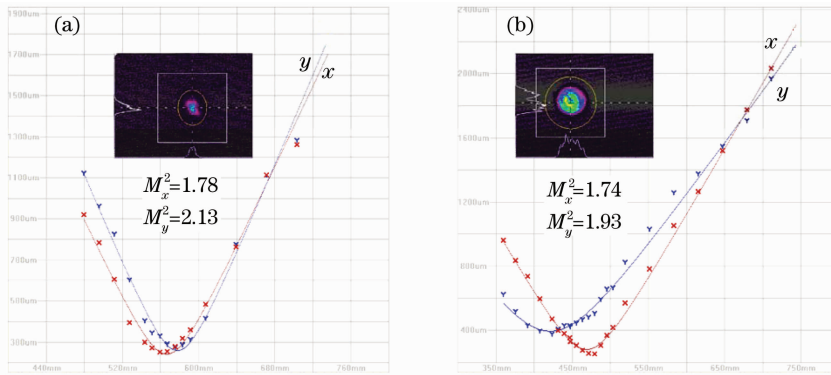


图 7 单通(a)以及双通(b)输出光束的光束空间分布及其光束质量测量曲线

Fig. 7 Spatial distribution and M^2 factor measurement curves for the single-pass and double-pass output beam

参 考 文 献

- Zhang Tieli, Yao Jianquan, Wang Peng *et al.*. Laser diode end-pumped, high-power continuous wave single frequency Nd:YVO₄ ring laser at 1064 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1194~1197
张铁犁, 姚建铨, 王 鹏 等. 端面抽运高功率连续单频 1064 nm Nd:YVO₄ 环行腔激光器 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1194~1197
- Liu Lang, Mi Guojiang, Huang Maoquan *et al.*. High repeating rate and big energy single longitudinal mode laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10): 885~889
刘 朗, 秘国江, 黄茂全 等. 高重复频率大能量单纵模激光器 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(10): 885~889
- Zheng Yaohui, Li Fengqin, Zhang Kuanshou *et al.*. Progress of all-solid-state single-frequency lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1635~1642
郑耀辉, 李凤琴, 张宽收 等. 全固态单频激光器研究进展 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1635~1642
- D. A. Rockwell. A review of phase-conjugate solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(6): 1124~1140
- Ding Yingchun, Lü Zhiwei, Han Songwei *et al.*. Development for the phase conjugated MOPA systems based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Laser Journal*, 2001, **22**(2): 1~5
丁迎春, 吕志伟, 韩松巍 等. 发展中的受激布里渊散射相位共轭 MOPA 系统 [J]. *激光杂志*, 2001, **22**(2): 1~5
- Liu Li, Lü Zhiwei, Li Zhengjia. Application of SBS phase conjugation technique in high power laser MOPA system [J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(2): 119~122
刘 莉, 吕志伟, 李正佳. SBS 相位共轭技术在强激光振-放系统上的应用 [J]. *激光技术*, 2005, **29**(2): 119~122
- H. L. Offerhaus, H. P. Godfried, W. J. Witteman. All solid-state diode pumped Nd:YAG MOPA with stimulated Brillouin phase conjugate mirror [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **128**(1-3): 61~65
- S. Seidel, N. Kugler. Nd:YAG 200-W average-power oscillator-amplifier system with stimulated Brillouin scattering phase conjugation and depolarization compensation [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, **14**(7): 1885~1888
- Hiroimitsu Kiriyaama, Koichi Yamakawa, Toru Nagai *et al.*. 360-W average power operation with a single-stage diode-pumped Nd:YAG amplifier at an 1-kHz repetition rate [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(18): 1671~1673
- H. Kiriyaama, K. Yamakawa. Development of high-repetition-rate LD pumped Nd:YAG laser and its application [J]. *Laser Physics*, 2006, **16**(9): 666~672
- T. Riesbeck, E. Risse, H. J. Eichler. Pulsed solid-state laser system with fiber phase conjugation and 315 W average output power [J]. *Appl. Phys. B*, 2001, **73**(8): 847~849
- Zhou Tao, Chen Jun, Tang Chun *et al.*. Fiber phase-conjugator in four-pass MOPA system with high repetition rate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4): 441~444
周 涛, 陈 军, 唐 淳 等. LD 抽运高重复频率四通放大 MOPA 系统中的光纤相位共轭研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 441~444
- Zhou Tao, Chen Jun, Tang Chun *et al.*. Experimental study on optical tapered fiber phase conjugator in MOPA system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4): 471~474
周 涛, 陈 军, 唐 淳 等. 主振荡功率放大激光器中锥度光纤相位共轭镜的实验研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 471~474
- Chong Liu, Jun Chen, Tao Zhou *et al.*. Tapered-fiber phase conjugator with high stability and high reflectivity used for master oscillator power amplifier systems [J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(1): 014201
- Wang Sha, Chen Jun, Tong Lixin *et al.*. New combined phase conjugator consisting of fused silicon rod and optical fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1212~1216
汪 莎, 陈 军, 童立新 等. 熔石英棒和光纤构成的新型复合型相位共轭镜 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1212~1216
- Wang Sha, Chen Jun, Tong Lixin *et al.*. Experimental and theoretical investigation of fused silica rod-fiber phase conjugator [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(3): 1719~1724
汪 莎, 陈 军, 童立新 等. 融石英棒-光纤构成的新型复合型相位共轭镜的实验和理论研究 [J]. *物理学报*, 2008, **57**(3): 1719~1724
- Wang Sha, Chen Jun, Tong Lixin *et al.*. Phase conjugating mirror combining a fused silica rod and a fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(18): 2686~2688
- Tong Lixin, Cui Lingling, Xie Gang *et al.*. Experimental investigation on characteristics of tapered fiber phase-conjugator with high repetition rate and high pulse energy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2361~2365
童立新, 崔玲玲, 谢 刚 等. 高重复频率高能条件下锥度光纤相位共轭镜特性的实验研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2361~2365