

文章编号: 0253-2239(2004)03-356-4

# 激光二极管抽运电光调 $Q$ 双通激光器中的 光纤相位共轭 \*

周 涛<sup>1</sup> 陈 军<sup>1</sup> 唐 淳<sup>1,2</sup> 高清松<sup>2</sup> 庞 毓<sup>2</sup>

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

**摘要:** 为了降低高重复频率脉冲固体激光器中热致光束畸变对光束质量的影响,在激光二极管抽运、电光调  $Q$  的 Nd:YAG 激光双通放大系统中对多模石英光纤相位共轭镜进行了实验研究。激光重复频率 100 Hz、脉宽 20 ns。实验结果表明,应用多模光纤能够显著改善放大级中热效应引入的波面畸变,双通获得近衍射极限的激光输出,并可大幅度压缩脉宽至 7 ns,达到了 3:1 的压缩比。在受激布里渊散射阈值附近,实验中观察到相位共轭光斑剧烈闪烁,而随着注入光纤能量的增大,闪烁现象渐渐消失,输出激光能量的稳定度提高,在注入能量 5.3 mJ 的情况下,获得了 14% 的能量不稳定性,此时的反射率和退偏率分别为 32.6% 和 7%。

**关键词:** 非线性光学; 相位共轭; 多模光纤; 电光调  $Q$ ; 主振荡器-脉冲放大器

中图分类号: O437.2, TN248.1 文献标识码: A

## Fiber Phase Conjugation in Laser Diode-Pumped, Electrooptical $Q$ -Switched Laser with Double-Pass Amplifier

Zhou Tao<sup>1</sup> Chen Jun<sup>1</sup> Tang Chun<sup>1,2</sup> Gao Qingsong<sup>2</sup> Pang Yu<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> *The State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027*  
<sup>2</sup> *Institute of Applied Electronics, The Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900*)

(Received December 17 2002; revised June 26 2003)

**Abstract:** To reduce the thermal effect to beam quality in solid-state laser with high repetition rate, multimode optical fiber as phase conjugator has been experimentally investigated in an laser diode-pumped, electrooptical  $Q$ -switched Nd:YAG laser with double-pass amplifier. The laser was operated on 100 Hz repetition rate and 20 ns pulse width. Perfect correction of laser profile distortion in amplifier and beam quality close to diffraction limit has been achieved. Pulse width of phase-conjugated laser was compressed to 7 ns while compression ratio reached 3:1. Beam glitter has also been observed in lower pumping energy close to stimulated Brillouin scattering (SBS) threshold. With increase of energy coupled into fiber, that phenomenon was weakened, and higher stability was achieved. In the case of 5.3 mJ input energy, instability less than 14% is obtained, while SBS reflectivity and depolarization ratio were 32.6% and 7% respectively.

**Key words:** nonlinear optics; phase conjugation; multimode fiber; electrooptical  $Q$ -switching; master oscillator pulse amplifier (MOPA)

## 1 引 言

激光二极管抽运的高重复频率的窄脉冲探测激光光源具有全固化、寿命长等优点而常用于远距离空间通信和激光跟踪探测等重要领域,然而增益介质中存在的热效应大幅度降低了输出激光的光束质

\* 国家自然科学基金、中国工程物理研究院联合基金 (10076015) 资助课题。

E-mail: chenjun1@zju.edu.cn

收稿日期: 2002-12-17; 收到修改稿日期: 2003-06-26

量并缩短了其探测距离。为了显著改善激光器的激光光束质量<sup>[1]</sup>并有效压缩脉冲宽度<sup>[2]</sup>,近年来,基于受激布里渊散射(SBS)原理的相位共轭技术被广泛应用于主振荡器-放大器(MOPA)激光系统中<sup>[3~5]</sup>。在已知的各种受激布里渊散射介质中,多模石英光纤由于具有较长的作用长度和较高的能量密度,可以显著降低受激布里渊散射产生的能量阈值<sup>[6]</sup>并获得较高的保真度<sup>[7]</sup>,而且具有液体和气体介质无法比拟的方便性、无毒和无环境危害性等优点而被关注。然而现有的实验报道中,光纤相位共轭器的实验研究通常在约为 1 Hz 的低重复频率抽运光源<sup>[8~10]</sup>,或者在高重复频率( $>10$  kHz)但脉宽较大(280 ns)、峰值功率很低的准连续激光系统<sup>[11]</sup>中进行,不能满足探测激光光源的要求;此外,现有的实验中均使用闪光灯抽运的被动调 Q 激光系统<sup>[6~11]</sup>,虽然可以获取较高的相干长度以降低受激布里渊散射能量阈值,但是被动调 Q 难以实现精确的同步控制,尚不能直接应用于探测激光系统中。因此,在本文中,我们通过一套输出激光脉宽 20 ns、重复频率 100 Hz 的电光调 Q、激光二极管侧向抽运的主振荡器脉冲放大器系统,针对高重复频率和窄脉宽激光抽运下的多模石英光纤相位共轭现象进行了实验研究。

## 2 实验装置

为了有效观察光纤作为相位共轭镜改善光束质量的现象,我们采用了主振荡器脉冲放大器结构的激光系统,其实验装置如图 1 所示。

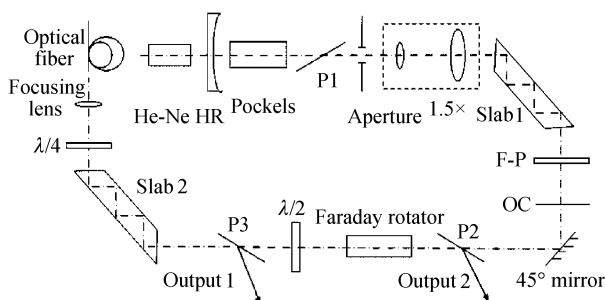


Fig. 1 Experimental setup applying multi-mode quartz fiber as phase conjugator

主振荡器的谐振腔由曲率半径 3 m 的全反凹面镜和  $R=80\%$  的输出镜 OC 构成,腔内用泡克耳斯(Pockels)盒电光调 Q,可获得脉宽 20 ns 的脉冲输出。增益介质为  $45^\circ$  的 YAG 晶体板条,长宽高规格为  $41\text{ mm}\times 2.8\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 。抽运源为楔形波导板耦合的高功率激光二极管,抽运脉宽为  $300\text{ }\mu\text{s}$ ,重

复频率为 100 Hz。由于板条的厚度较大,腔内插入了 1.5 倍扩束镜来增大模体积并使用了  $\phi 1.5\text{ mm}$  的小孔限模,最大可获得 2.75 mJ 的  $\text{TEM}_{00}$  模激光输出。为了提高输出激光的相干长度以降低光纤相位共轭产生的阈值能量,输出镜前还插入了一块 2 mm 厚、双面镀有反射率 50% 的法布里-珀罗标准具进行纵模抑制,相干长度约为 17 cm。

振荡级输出激光经由偏振片 P2、P3、 $45^\circ$  的法拉第旋光器和快轴  $22.5^\circ$  放置的  $\lambda/2$  波片组成的隔离器后,使用同样规格的 YAG 板条和激光二极管进行单通放大,单通放大最大可以获得 5.3 mJ 的调 Q 激光输出。单通放大的调 Q 激光通过  $\lambda/4$  波片后,经  $f=18\text{ mm}$  的汇聚透镜耦合到光纤中,耦合效率约为 82%。实验中采用了芯径  $200\text{ }\mu\text{m}$  的多模石英光纤 FT-200,长度根据需要在 2~5 m 之间选择,其标称的损伤峰值功率是 0.4 MW,数值孔径  $NA=0.22$ 。光纤相位共轭反射光将再次经过  $\lambda/4$  波片和放大级板条 2 放大,并于 Output1 处射出。若光纤相位共轭过程中产生了退偏,则退偏光将于 Output2 处射出,通过测量此处的输出能量可以得到光纤相位共轭的退偏率。

## 3 实验结果与讨论

相位共轭现象可以通过输出光斑的强度分布变化直观地观察,图 2 示出了振荡级输出(a)、使用平面全反镜双通放大输出(b)和使用光纤相位共轭器的双通放大输出(c)的二维和三维光斑分布图。从图 2(a)中可以看到,振荡级光斑横模模式接近  $\text{TEM}_{00}$  模,光斑直径约为 1.8 mm,光束远场发散角为 0.37 mrad。而通过放大级时,由于放大级的板条中存在热透镜效应,使得光斑面型发生畸变;在使用平面全反镜后的双通放大光斑中尤为显著,如图 2(b)中所示,光斑为长条形,大小约为  $2.7\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 。而图 2(c)示出的通过光纤相位共轭后的光斑形状则接近振荡级输出。

相位共轭的另一显著特征是脉冲压缩,图 3 示出了振荡级输出激光以及相位共轭光的单脉冲波形图。图中振荡级激光波形的周期性起伏是由多纵模拍频形成。经过光纤相位共轭镜反射后的脉冲宽度被大幅度压缩,从 20 ns 压缩到 7 ns,压缩比达到了 3:1,而且波形平滑。

实验中还观察到:在阈值附近光斑能量波动的相对幅度剧烈,通过感光片探测显示,光斑闪烁剧烈;而伴随着抽运能量的提高,光斑的闪烁程度降低,能量

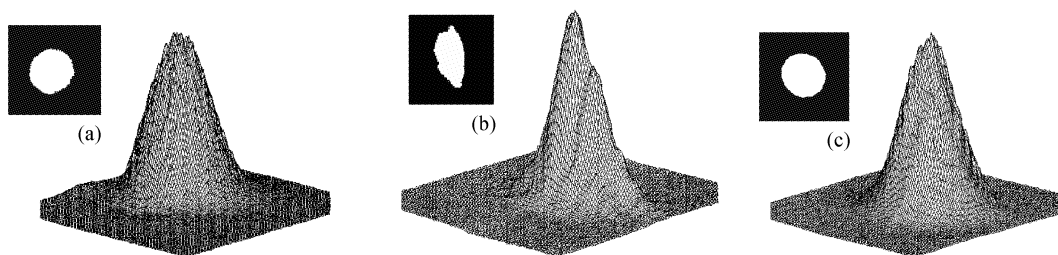


Fig. 2 CCD accepted 2D and 3D beam profiles of laser beams: (a) from oscillator, (b) after double-pass amplification applying general HR mirror, (c) after double-pass amplification applying optical fiber phase-conjugator

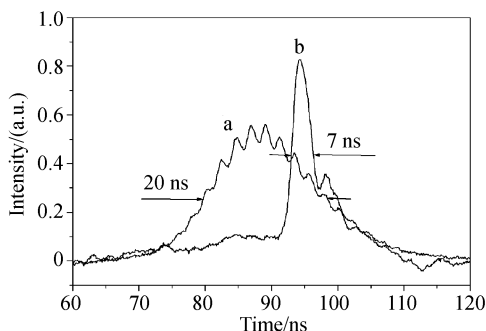


Fig. 3 Pulse shapes of lasers outputted from oscillator and reflected by fiber phase-conjugator

波动幅度也降低。通过快速光电二极管(PIN)管测量了这两种情况下的多脉冲波形,分别如图4所示。

分析认为,激光系统中存在的动态热效应引起光纤注入激光的脉宽和能量波动是影响相位共轭光多脉冲稳定性的主导原因。在受激布里渊散射阈值附近,注入光参量的波动使得部分光脉冲无法达到受激布里渊散射阈值而获得有效反射,因此多脉冲波形中会出现大幅度起伏和残缺现象,如图4(a)所示,在感光片上就形成剧烈的光斑闪烁现象。而远高于阈值时,光纤相位共轭器对注入光参量的变化不敏感,相对能量波动幅度降低,图4(b)中所示,在感光片上的闪烁现象也随之削弱。

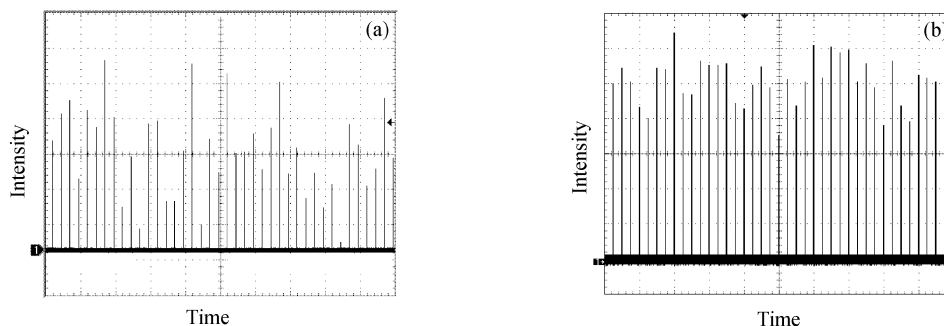


Fig. 4 Multi-pulse shapes of phase-conjugated laser when (a) input energy was just above SBS energy threshold, (b) near 32% SBS reflectivity was achieved

在图5中示出了受激布里渊散射反射率、双通输

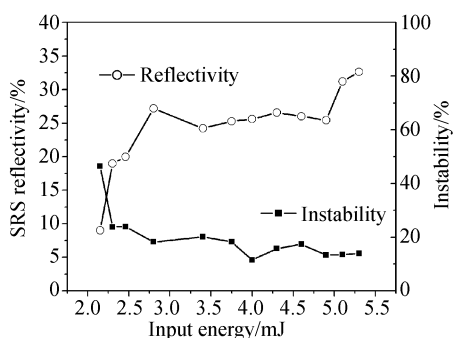


Fig. 5 Dependences of SBS reflectivity and instability on input energy

出能量不稳定性随着注入光纤的能量变化的关系,其中不稳定性定义为图4所示的相位共轭光多脉冲峰值的统计方差与其平均值的比值。从图中可以看到,反射率随着抽运能量升高而升高,而输出能量不稳定性也有所降低。受激布里渊散射产生的阈值是2.15 mJ,获得的最大反射率为32.6%,此时的不稳定性小于14%。

图6分别示出了双通输出能量和退偏能量随着注入能量的变化趋势。可见随着注入能量的增大及反射率的相应提高,双通放大和退偏能量均呈现出近似线性的增长趋势,最终获得的双通能量为2.5 mJ,退偏光所占的比例小于7%。另外,实验中观察到

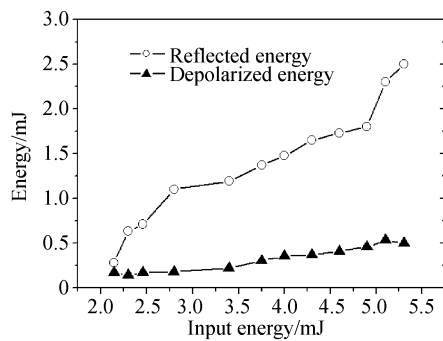


Fig. 6 Dependences of double-passed energy and depolarized energy on input energy

的损伤能量阈值 5.3 mJ 低于光纤本身标称的损伤能量阈值 8 mJ,分析认为是由于为了获得较高的耦合效率,严重畸变的单通放大激光,在光纤表面处的聚焦光斑小于光纤内芯面积,使得光纤表面局部能量密度高于损伤阈值所致。

**结论** 本文报道了在高重复频率、窄脉冲 1064 nm 激光输出的激光二极管抽运、电光调 Q 主振荡器脉冲放大器激光系统中的应用多模石英光纤作为相位共轭镜的实验研究。实验结果表明,在重复频率 100 Hz、脉冲宽度 20 ns 的输出激光脉冲注入下,光纤相位共轭镜对放大级热效应造成的光束畸变有着显著的改善效果。受到相干长度较低的影响,实验中可获得的最大反射率为 32.6%。双通输出了 2.5 mJ、退偏小于 7% 且能量不稳定性小于 14% 的 TEM<sub>00</sub> 模激光输出。

### 参 考 资 料

- 1 Hans Bruesselbach, Jones D C, David A *et al.*. Real-time atmospheric compensation by stimulated Brillouin scattering phase conjugation. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1995, **12**(6):1434~1447
- 2 Dane C B, Neuman W A, Hackel L A. High-energy SBS pulse compression. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(8):1907~1915
- 3 Offerhaus H L, Godfried H P, Wittman W J. All solid-state diode pumped Nd:YAG MOPA with stimulated Brillouin phase conjugate mirror. *Opt. Commun.*, 1996, **128**(1~3):61~65
- 4 Dane C B, Zapata L E, Neuman W A *et al.*. Design and operation of a 150 W near diffraction-limited laser amplifier with SBS wavefront correction. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1995, **31**(1):148~163
- 5 Kovalev V I, Harrison R G. Diffraction limited output from a CW Nd:YAG master oscillator/power amplifier with fiber phase conjugate SBS mirror. *Opt. Commun.*, 1999, **166**(1~6):89~93
- 6 Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. 2nd edition Academic Press, 1995
- 7 Eichler H J, Haase A, Kunde J *et al.*. Fiber phase-conjugator as reflecting mirror in a MOPA-arrangement. *Proc. SPIE*, 1997, **2986**:46~54
- 8 Eichler H J, Kunde J, Liu B. Quartz fiber phase conjugators with high fidelity and reflectivity. *Opt. Commun.*, 1997, **139**(4~5):327~334
- 9 Eichler H J, Kunde J, Liu B. SBS phase conjugation in multimode quartz fibers. *CLEO Conference*, 1997. 114~115
- 10 Eichler H J, Liu B, Wittler O *et al.*. Saturation and oscillation of SBS reflectivity in fiber phase conjugators. *Nonlinear Optics '98. Conference*, 1998. 337~338
- 11 Eichler H J, Mehl O, Risse E. Continuously pumped all-solid-state laser system with fiber phase conjugation. *CLEO Conference*, 2000. 404~405