

文章编号: 0258-7025(2004)04-0441-04

LD 抽运高重复频率四通放大 MOPA 系统中的 的光纤相位共轭研究

周 涛¹, 陈 军¹, 唐 淳^{1,2}, 高清松², 庞 毓², 童立新², 卓有福²

(¹ 浙江大学信息学院, 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 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 LD 抽运激光器的实验研究。由于光纤受激布里渊散射(SBS)存在的阈值效应, 可以抑止使用平面全反镜的四通放大系统中难以克服的放大级自振荡(SO)和放大自发辐射(ASE)效应, 以获得高能量高光束质量的激光输出。实验中在 20 ns, 100 Hz 和注入光纤能量 4.6 mJ 的情况下获得了 4.1 mJ 的 1064 nm 的基模激光输出。激光光束模式接近 TEM₀₀ 模, 且脉宽被压缩至 4.7 ns。在使用了光纤相位共轭镜的四通放大技术后, 很好地补偿了由板条放大器热效应造成的光斑畸变。输出光斑很好地复原了振荡级输出光斑的光强空间分布。

关键词 激光技术; 光纤相位共轭镜; 四通放大 MOPA; 高重复频率

中图分类号 TN 24 **文献标识码** A

Fiber Phase-Conjugator in Four-Pass MOPA System with High Repetition Rate

ZHOU Tao¹, CHEN Jun¹, TANG Chun^{1,2}, GAO Qing-song²,
PANG Yu², TONG Li-xin², ZUO You-fu²

(¹ Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)
(² Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Using a 200 μm -core multimode optical fiber as the phase conjugator mirror, an LD-pumped Q-switched four-pass MOPA system operated on 100 Hz repetition rate and 20 ns pulse width has been experimental investigated in this paper. As a result, high quality laser beam with energy of 4.1 mJ and energy-stability less than 10% have been obtained when 4.6 mJ pump energy injected into fiber phase conjugator. The self-oscillating (SO) in amplifier and amplified spontaneous emission (ASE) has been validly suppressed. In additional, the pulse width of laser has been compressed to 4.7 ns. Due to the using of fiber phase conjugating mirror, the deformation formed by the thermal effect from the slab amplifier has been compensated after four passing. The output beam profile resumes the intensity distribution of the oscillator output beam.

Key words laser technique; phase-conjugation; four-pass MOPA; high repetition

1 引 言

多通放大是一种有效提高激光放大器内的能量抽取效率和系统整体输出能量的技术手段, 已经在 MOPA 系统中获得了应用^[1~5]。然而在使用普通平面反射镜的四通放大系统中, 既不能改善增益介

质热效应造成的波形畸变^[6], 也无法有效地消除放大级中全反射镜之间的自发辐射放大(ASE)和自振荡(SO)现象^[3,4], 或者需要借助于环形偏转光路及其他特殊的手段来消除^[7,8], 从而限制了这一技术的更广泛使用。而应用相位共轭镜(PCM)来代替全反镜, 可以实时、动态地补偿激光光束畸变来获得

收稿日期: 2002-12-06; 收到修改稿日期: 2003-02-27

基金项目: 国家自然科学基金中国工程物理研究院联合基金(编号: 10076015)资助项目。

作者简介: 周 涛(1978—), 男, 博士生, 主要从事激光技术和非线性光学研究。E-mail: zhj_zht@sohu.com

高光束质量的激光输出^[9],且能利用受激布里渊散射(SBS)实现激光脉冲压缩以提高激光脉冲的峰值功率^[10]。同时,SBS存在的阈值效应使得放大级中形成的自发辐射的荧光无法在相位共轭镜和平面镜之间形成自振荡,从而有效抑制住 ASE 现象。迄今为止,应用液池或者气池 SBS 池作为相位共轭镜的多通放大系统已有部分报道^[3,5],也有一些使用光纤相位共轭镜来校正波形畸变和获取高保真度的实验研究^[11,12]。但是应用光纤相位共轭镜于高重复频率、窄脉冲的四通 MOPA 系统的报道尚未看到,H. J. Eichler 等曾提出这种构想并阐述了其改善系统输出性能的原理,但是并未通过实验实现^[13]。本文通过一套输出激光脉宽 20 ns,重复频率 100 Hz 的 MOPA 系统,应用芯径 $\phi 200 \mu\text{m}$ 的多模光纤对此进行了实验研究和一定的分析。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。振荡级的谐振腔腔长为 45 cm,由曲率半径为 3 m 的全反镜和反射率 80% 的平面镜组成。在腔内使用了 Pockel 盒进行电光调 Q,可以输出脉宽 20 ns 的窄脉冲。增益介质是 45° 的梯形 Nd:YAG 板条,规格为 2.8 mm×6 mm×41 mm,使用具有 32 个 bar,峰值功率 960 W 的

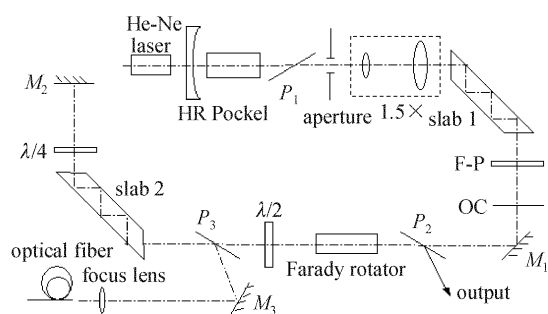


图 1 多模光纤相位共轭四通放大实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of four-pass amplifier with optical fiber phase-conjugator

LD 抽运。LD 通过楔形波导板耦合,耦合后的斑点尺寸为 4 mm×40 mm,且发散角接近 90°。因此板条 1 内的抽运光功率密度较低且抽运区域较大,为了提高腔内基模的模体积以及提高抽取效率,在腔内使用了 1.5 倍的望远扩束系统并且通过 $\phi 1.5 \text{ mm}$ 的光阑来获得 TEM₀₀ 模输出。实验结果表明,振荡级的输出能量可以提高 0.7 倍,且使得输出激光的光斑大小可以和放大级板条的截面相匹配。为

为了提高激光的相干长度以降低 SBS 产生的阈值,实验中使用了一块厚度 2 mm,两表面镀有 50% 反射膜的 F-P 标准具来压缩纵模数目,并将标准具略微调斜以避免代替输出镜形成振荡。插入标准具后,SBS 阈值由 3.7 mJ 下降到了 1.2 mJ。

主振荡级和放大级之间的隔离器由偏振片 P_2 , P_3 , 45° 的法拉第旋光器和快轴 22.5° 放置的 $\lambda/2$ 波片构成,整体光损耗约为 17%。振荡级输出的激光经过隔离器后,注入与振荡级参数相同的 YAG 板条 2 以及 $\lambda/4$ 波片和全反镜 M_2 进行双通放大。双通放大后的激光被 P_3 和 M_3 反射,并通过 $f = 18 \text{ mm}$ 的聚焦透镜耦合到光纤中,耦合效率约为 85%。根据国外的实验报道^[12]和我们的理论分析结果^[14],实验中选取 3M 公司芯径 $\phi 200 \mu\text{m}$ 的高损伤阈值光纤 FT-200,长度为 2.3 m。经过光纤相位共轭器反射的激光将再次通过板条 2 形成四通放大,然后在偏振片 P_2 的方向被观察和探测。

3 实验结果和讨论

由于放大级 YAG 板条内的热沉积比较严重,使得放大后的输出激光光斑有着显著的面形畸变,因此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 CCD 接收到的光斑截面分布图。由于放大级的板条结构通过“之”形光路可以部分地补偿水平方向上热畸变,但是无法补偿垂直方向上的热透镜效应,因此从图中可以明显观察到双通放大输出的近场光斑(b)畸变成长条形,在应用普通全反平面镜的四通放大(c)中波形畸变更明显。而通过光纤相位共轭后的光斑(d)则很好地复原了振荡级的输出光斑(a)的面形分布。

图 3 示出了振荡级输出激光的单脉冲波形图,而经过光纤相位共轭后的波形示于图 4。可以看到,脉冲宽度被较大幅度压缩了,压缩比达 4.2:1。

在使用普通全反镜代替光纤做四通时,它和 M_2 间形成了一个 F-P 谐振腔,在放大级抽运能量较高的情况下会产生弛豫振荡,输出和振荡级激光相位不相干、峰值功率低很多的子脉冲序列。这种现象消耗了放大级板条中上能级的反转粒子,会降低整个系统的输出能量。而对于光纤相位共轭镜,只有高于 SBS 阈值的光才能被有效反射,且反射率随着注入能量增大而上升。由于达不到 SBS 阈值,放大级中自发辐射产生的荧光只能获得光纤表面约 4% 的反射率,因此无法在 M_2 和光纤相位共轭镜之间

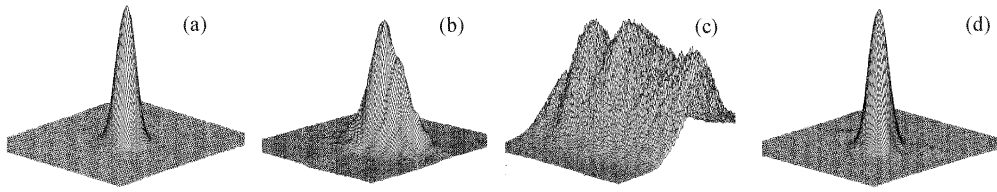


图 2 CCD 接收到的光斑截面分布图

(a) 振荡级输出; (b) 双通放大输出; (c) 应用全反镜的四通放大输出; (d) 应用光纤相位共轭镜的四通放大后输出

Fig. 2 CCD captured transverse intensity distributions of laser beam from

(a) oscillator; (b) double-pass;

(c) four-pass using mirror with 100% reflectivity; (d) four-pass using fiber phase-conjugator

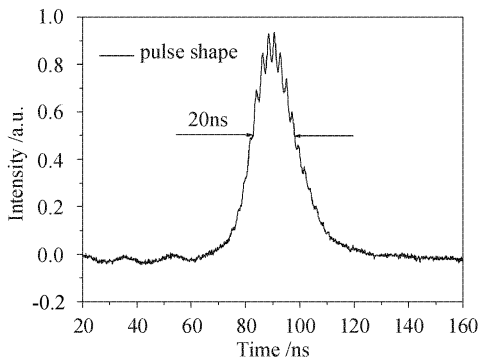


图 3 振荡级输出激光的时间波形

Fig. 3 Pulse shape of laser beam outputted from oscillator

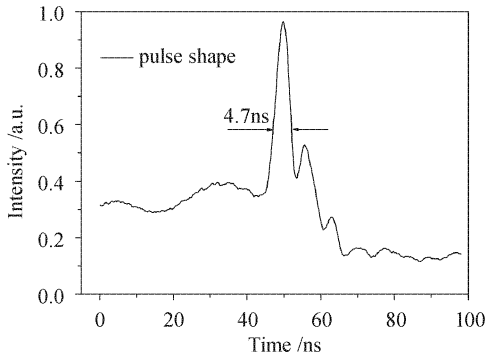


图 4 相位共轭光的时间波形

Fig. 4 Pulse shape of phase-conjugated laser beam

被往返放大、累积并形成振荡输出。在实验过程中，如果通过拦截振荡级的输出光就可以在 Output 处观察到放大级的自激振荡光输出。在使用全反平面镜时观察到了 3.2 mJ 的自发辐射能量，但在使用光纤相位共轭镜时用最小量程 20 mW，精度 0.1 mW 的功率探测器并未探测到任何自激振荡的能量输出，这说明 ASE 被有效地抑止住了。图 5 示出了双通放大注入光纤的能量和四通放大的相位共轭光能量之间的关系。从图中可以看到 SBS 产生的阈值

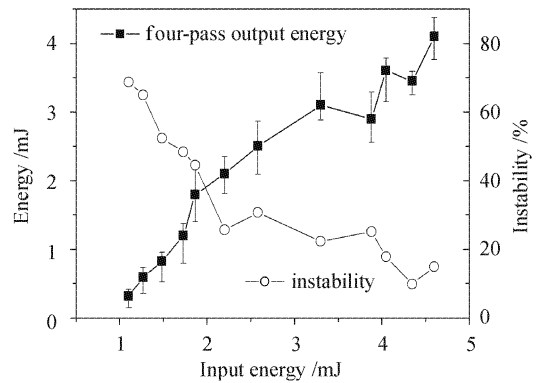


图 5 四通放大输出能量、不稳定性和光纤注入能量间的关系图

Fig. 5 Four-pass output energy, energy instability vs input energy injected into fiber

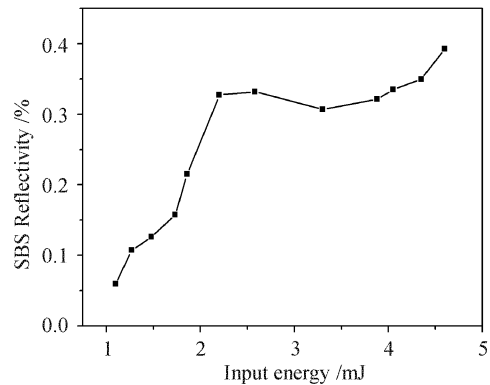


图 6 SBS 反射率和光纤注入能量间的关系图

Fig. 6 SBS reflectivity vs input energy injected into fiber

是 1.2 mJ，在抑止放大级的 ASE 现象以后带有光纤相位共轭镜的四通放大系统可以获得和双通放大近似的输出能量，但是光束质量可以显著获得改善。输出能量的不稳定性可以低至 17% 左右。图 6 示出了 SBS 反射率随光纤注入能量的变化；实验中最大反射率为 39%，较国外的实验报道略低^[11,12]。

需要指出的是,由于 M_2 无法解决放大级板条中热效应造成的激光偏振态退偏现象,所以在没有光纤的情况下, P_3 位置也可以观察到一定的激光输出,和双通放大输出能量的比例约在 12% 以内。若将 M_2 和光纤对换也能形成四通放大而且没有自振荡现象,且能降低退偏度,但是考虑到 SBS 反射率随注入能量增大而上升,将光纤相位共轭镜放置在双通放大处可以提高其反射率以及整个系统的输出能量。

4 结 论

通过在重复频率 100 Hz,脉冲宽度 20ns 的电光调 Q, LD 抽运的激光系统中使用光纤相位共轭镜实现四通放大的实验研究,证明了多模石英光纤作为相位共轭镜来实现四通放大可以有效抑止放大级自发辐射放大和自振荡效应,并能显著校正放大级板条热沉积对激光光束造成的面形畸变。在注入光纤能量 4.6 mJ 的情况下,四通放大可以获得输出能量 4.1 mJ,能量不稳定性约为 17% 且光斑模式接近 TEM₀₀ 模的相位共轭激光输出。

参 考 文 献

- 1 H. Plaessmann, S. A. Re, J. J. Alonis *et al.*. Multipass diode-pumped solid-state optical amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(17):1420~1423
 - 2 E. S. Lee, J. W. Hahn. Four-pass amplifier for the pulsed amplification of a narrow-bandwidth continuous-wave dye laser [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(22):1836~1839
 - 3 F. Druon, F. Balembois, P. Georges *et al.*. High-repetition-rate 300-ps pulsed ultraviolet source with a passively Q-switched microchip laser and a multipass amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(7):499~501
 - 4 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
 - 5 U. Roth, Thomas Graf, E. Rochat *et al.*. Saturation, gain, and noise properties of a multipass diode-laser-pumped Nd:YAG CW amplifier [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(10):1987~1991
 - 6 Victor Wang, C. R. Ginliano. Correction of phase aberrations via stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt. Lett.*, 1978, **2**(1):4~6
 - 7 E. S. Lee, J. W. Hahn. Four-pass amplifier for the pulsed amplification of a narrow-bandwidth continuous-wave dye laser [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(22):1836~1838
 - 8 J. W. Hahn, Y. S. Yoo. A new design of four-pass dye laser amplifier and suppression of amplified spontaneous emission [C]. *CLEO Conference*, 1998. 263
 - 9 Hans Bruesselbach, D. C. Jones, David A. Rockwell *et al.*. Real-time atmospheric compensation by stimulated Brillouin scattering phase conjugation [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(6):1434~1447
 - 10 T. H. David. Pulse compression by stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(12):516~518
 - 11 H. J. Eichler, A. Haase, J. Kunde *et al.*. Fiber phase-conjugator as reflecting mirror in a MOPA-arrangement [C]. *SPIE*, 1997, **2986**:46~54
 - 12 H. J. Eichler, J. Kunde, B. Liu. Quartz fibre phase conjugators with high fidelity and reflectivity [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **139**:327~334
 - 13 H. J. Eichler, O. Mehl, E. Risse. Continuously pumped all-solid-state laser system with fiber phase conjugation [C]. *CLEO Conference*, 2000. 404~405
 - 14 Chen Jun, Zhou Tao, Zhu Qi. Numerical analysis of temporal stimulated Brillouin scattering in optical fiber [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(1):65~69
- 陈 军,周 涛,朱 琦. 光纤中的瞬态 SBS 过程的数值分析与探讨[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(1):65~69