

文章编号: 0258-7025(2010)09-2361-05

高重复频率高能量条件下锥度光纤相位共轭器特性的实验研究

童立新¹ 崔玲玲¹ 谢刚¹ 高清松¹ 唐淳¹ 赵智刚² 刘崇^{2*} 陈军²

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

摘要 使用最高重复频率可达 1000 Hz 的脉冲激光二极管抽运的电光调 Q 单纵模激光器作为种子源, 经过两级预放大器和两级主功率放大器后获得高重复频率高能量的激光输出。然后使用此光源对由芯径为 1 mm 和 400 μm 的石英光纤组合而成的大口径锥度光纤固体相位共轭镜在重复频率分别为 1000, 500 和 400 Hz 情况下的受激布里渊散射反射率进行了详细的实验研究, 并分别得到 33.3%, 41.2% 和 50.7% 的最高反射率。实现了固体相位共轭镜在高重复频率大能量条件下大于 50% 的受激布里渊散射反射率。在重复频率为 400 Hz 时, 激光脉冲宽度从 24 ns 压缩到 6 ns, 压缩比为 4:1, 且脉冲光滑无调制。

关键词 激光器; 高重复频率; 大能量; 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/CJL20103709.2361

Experimental Investigation on Characteristics of Tapered Fiber Phase-Conjugator with High Repetition Rate and High Pulse Energy

Tong Lixin¹ Cui Lingling¹ Xie Gang¹ Gao Qingsong¹ Tang Chun¹

Zhao Zhigang² Liu Chong² Chen Jun²

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

Abstract High repetition rate and high energy laser is realized by two-stage pre-amplifiers and two-stage main amplifiers seeded by a pulsed diodes pumped EO Q-switched single-longitudinal-mode laser with pulse repetition rate up to 1000 Hz. Detailed experimental investigation on stimulated Brillouin scattering reflectivity of a large aperture fused silica fiber is carried out using this laser source. Reflectivities of 33.3%, 41.2% and 50.7% are achieved at the repetition rate of 1000, 500 and 400 Hz respectively. The tapered fiber's core diameters are 1 mm and 400 μm for its two end surfaces. More than 50% stimulated Brillouin scattering reflectivity with such high repetition rate and high energy is realized. At the repetition rate of 400 Hz, the pulse duration is compressed to 6 ns from 24 ns, with a compression ratio of 4:1. The pulse shape is free of modulation.

Key words lasers; high repetition rate; high pulse energy; phase conjugation; tapered fiber

1 引 言

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^[1~3]。相对于使用气体、液体作为 SBS 介质的相位共轭镜, 固体相位共轭镜逐步显示出其在实际激光系统, 尤其是在高功率全固态

收稿日期: 2010-06-04; 收到修改稿日期: 2010-07-07

作者简介: 童立新(1979—), 男, 助理研究员, 主要从事高功率激光二极管抽运固体激光器技术方面的研究。

E-mail: tllxll@yahoo.com.cn

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

主振荡-功率放大(MOPA)激光系统中的应用前景和价值^[4,5]。因此,为了满足 SBS 相位共轭技术进一步走向实用化的迫切需求,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、操作方便的相位共轭系统,实现装置的全固化,具有重要的实际意义^[6]。

目前,可用作固体相位共轭镜的材料主要是石英,具体形式已经有四种:多模石英光纤相位共轭镜^[7]、锥度光纤相位共轭镜^[8,9]、融石英棒相位共轭镜^[10]以及融石英棒和光纤构成的复合相位共轭镜^[11~14]。周涛等^[7~9]曾对石英光纤相位共轭镜和锥度光纤相位共轭镜进行过较多的理论和实验研究。2004年,他们在重复频率 100 Hz,注入能量 4.6 mJ 的情况下,使用芯径 200 μm 的石英光纤实现了最高 39% 的 SBS 反射率^[7];2005年,他们又在重复频率 100 Hz,注入能量 3 mJ 的情况下,使用从 400 μm 到 200 μm 过渡的锥度光纤实现了最高 85% 的 SBS 反射率^[8]。2006年,作者所在小组^[10]曾报道使用融石英棒作为相位共轭镜的实验研究,发现在注入能量不变的情况下,其反射率随着重复频率的增加显著下降,在 50 Hz 时 SBS 反射率为 43%,而当重复频率增加到 400 Hz 时,SBS 反射率骤减到 22%。2008年,汪莎等^[11,12]报道了由融石英棒和光纤构成的复合相位共轭镜,在 100 Hz 的重复频率下,输入的单脉冲能量在 41.9 mJ 时,最高获得了 42.05% 的 SBS 反射率;而在 400 Hz 重复频率下,输入的单脉冲能量在 55 mJ 时,仅获得最高 11.6% 的 SBS 反射率^[12]。对于周涛等报道的石英光纤和锥度光纤相位共轭镜,其可注入能量较低,且只运行在重复频率较低的 100 Hz,严重制约了其在实际激光系统中的应用;而对于融石英棒或者是由融石英棒和光纤组合而成的相位共轭镜,虽然重复频率可以提高到 400 Hz,注入能量也较大,但在高重复频率下的 SBS 反射率过低,这样低的发射率显然是不能满足固体激光系统高效率运转的要求的。因此,提高固体相位共轭镜在高重复频率高能量条件下的发射率就成为了一项有着切实意义的工作。

本文基于由 1 mm 和 400 μm 石英光纤组成的大口径锥度光纤相位共轭镜,使用脉冲激光二极管抽运的电光调 Q 单纵模 Nd:YAG 激光器作为种子

源,采用 MOPA 结构放大后得到高重复频率大能量激光光源,并基于此光源对自行设计的大口径锥度光纤的 SBS 反射率进行了实验研究。

2 实验装置

实验装置原理图如图 1 所示。其中种子源为脉冲激光二极管抽运的升压式电光调 Q 单纵模(SLM)Nd:YAG 激光器,图 2 为其输出激光脉冲的时间波形,脉冲宽度为 24 ns 左右,在重复频率为 1000 Hz 条件下的输出功率为 1.2 W。由种子源输出的单纵模激光依次通过扩束装置和光学隔离器 I 进入两级预放大器进行放大,输出光束再经过光学隔离器 II 进入两个主放大器进行放大。从 BP-1 处反射出的部分振荡器激光被快速光电二极管(PD)探测并由示波器显示,实时监测脉冲波形。光学隔离器 I 和 II 的具体结构,是由两个对称放置的薄膜偏振片(BP)、法拉第旋光器和 $\lambda/2$ 波片组成的,实现前级和后级的光学隔离,避免光学元件损坏。在主放大器 II 之后放置的 $\lambda/2$ 波片与 BP-4 构成光强调节机构,用于调节进入锥度光纤相位共轭镜的功率,透过 BP-4 的激光被限制在光学陷阱中;被 BP-4 反射的激光则经由 BP-5, $\lambda/4$ 波片和长焦距透镜会聚进入锥度光纤。两级预放大器和两级主放大器均采用脉冲激光二极管侧面抽运结构,增益介质为 Nd:YAG 晶体。为了补偿两级放大器的退偏,在两个放大器之间加入 90° 石英旋光器和 $4f$ 成像系统对其进行补偿。

在测量锥度光纤的 SBS 反射率时,由于其前方的 $\lambda/4$ 波片的作用可以使入射的 S 偏振光在来回两次通过它后变为 P 偏振光,这样 SBS 反射光就可以经由 BP-5 输出,便于对其进行测量。

实验中使用的锥度光纤前端面直径为 1 mm,后端面直径为 400 μm ,中间为过渡区域。按照估算,这样的结构可以使直径为 1 mm 的光纤入射端面 and 直径为 400 μm 的光纤出射端面基本上同时达到光纤端面的损伤,不会使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。这也与在实验中观察到的现象相符,在重复频率为 400 Hz,注入脉冲能量达到 40 mJ 时,400 μm 光纤的后端面通常会先发出响声并闪烁火花,若此时再稍微加大注入能量,则会在激光单纵模特性欠佳时将前端面打坏,相位共轭镜失效。

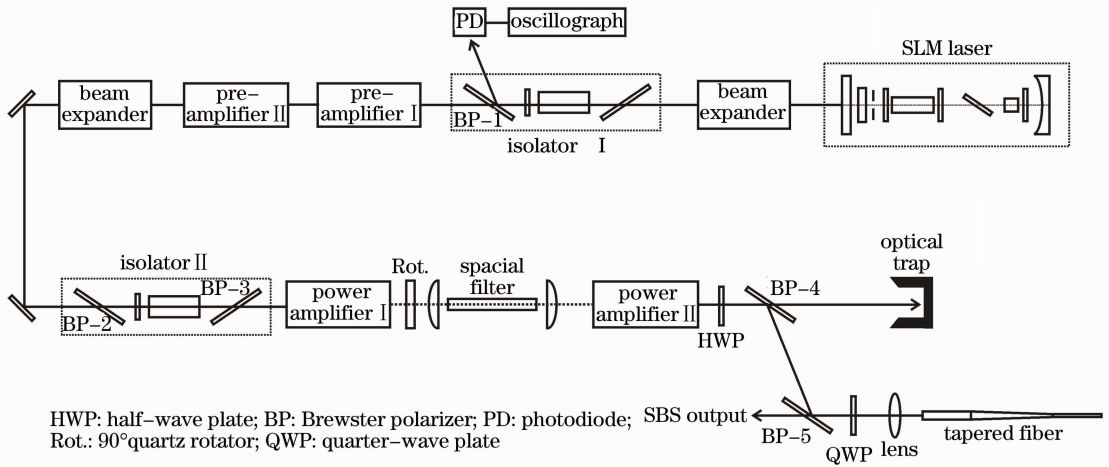


图 1 实验装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

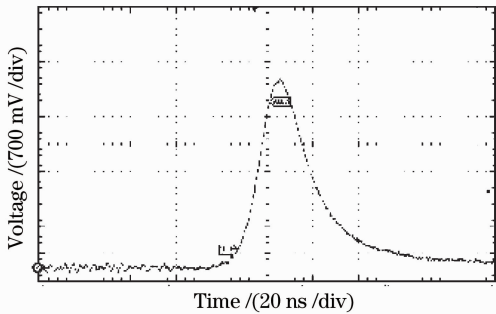


图 2 单纵模激光器输出的典型脉冲波形

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

3 实验结果与分析

在进行实验之前,首先采用上升时间小于 40 ps,带宽大于 7.5 GHz 的超快速光电探测器对从放大器输出的激光脉冲的时间特性进行测量,其结果如图 3 所示。从种子激光器输出的激光脉冲宽

度和从放大器输出的激光脉冲宽度分别为 23.0 ns 和 23.6 ns,并没有明显的脉冲展宽或者压缩现象,且脉冲形状均非常光滑,可以认为其具有很好的单纵模特性。

在进行实验时,首先使种子激光器及两级预放大器和两级主放大器均工作在 1000 Hz 的重复频率下,然后仔细调整光纤支架,在小功率条件下使激光耦合到光纤中去,并从其尾部输出,调整的很好状态可以使耦合效率达到 90%左右,这与入射端面处使用芯径 1 mm 的大口径光纤很有关系。通过调节 BP-4 前面的 $\lambda/2$ 波片,使进入锥度光纤的功率逐步增大,在 BP-5 左侧便可测量到 SBS 反射激光,进而计算得到锥度光纤相位共轭镜的反射率。激光器的重复频率和放大器的重复频率均可以通过调整同步触发信号及其相对延时进行调整,在系统中可实现重复频率为 1000,500 和 400 Hz 三档之间的切换,但切换时还需更改预放大器和主放大器的热透镜补偿透镜,这是由于不同重复频率下的激光增益介质热透镜效应不同所导致的。

图 4,5 分别给出了锥度光纤相位共轭镜在 1000,500 和 400 Hz 的高重复频率条件下的 SBS 反射能量和 SBS 反射率。从图中可以看出,在重复频率为 1000,500 和 400 Hz,以及注入单脉冲能量分别为 17.4,36.6 和 37.75 mJ 条件下,分别获得了最高为 5.7,14.9 和 19.125 mJ 的 SBS 反射能量,对应 33.3%,41.2% 和 50.7% 的 SBS 反射率。图 6 为在重复频率为 400 Hz 条件下测得的 SBS 反射光的脉冲宽度。从图中可以看出,反射光的脉冲宽度约为 6 ns,相对于入射激光脉冲宽度 24 ns,被压缩到原来的 1/4,且该脉冲上升沿极陡,小于 2 ns,非

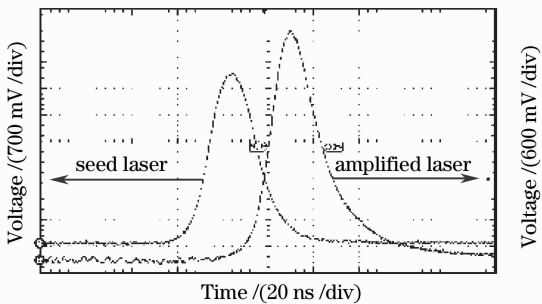


图 3 重复频率为 400 Hz 时,种子源脉冲形状和放大后的激光脉冲形状

Fig. 3 Pulse shapes of the seed laser and the amplified laser at pulse repetition rate of 400 Hz

常符合 SBS 脉冲的典型特征;且脉冲非常光滑,没有调制现象,这与文献[9]的理论分析有所区别,对于此现象还需进一步深入研究。在不同重复频率条件下,对于该锥度光纤,虽然可注入的平均功率均可达到 16 W 左右,但是可达到的最高 SBS 反射率却不甚相同,因此最高 SBS 反射率与激光单脉冲能量有直接的关系,而平均功率却与光纤的损坏有直接关系。因此,在下一步的工作中,希望能在 1000 Hz 条件下,并且增大单脉冲能量到 40 mJ,并对光纤进行主动冷却,做一些实验与其进行对比。还有一点需要指出的是,在实验中也出现过单纵模特性不好的情况,应尽量避免相位共轭镜处于工作状态,因为多纵模激光相互干涉产生拍频,激光的脉冲形状被调制,而调制的周期在纳秒量级,这样就很容易形成峰值功率很高的尖峰,对光纤表面造成不必要的损伤。这也对种子激光器单纵模特性的稳定性提出了更为苛刻的要求。

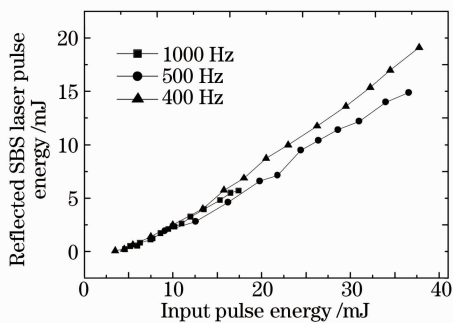


图 4 重复频率不同时,锥度光纤相位共轭镜反射能量随注入能量的变化情况

Fig. 4 Reflected SBS energy of the tapered fiber conjugating mirror versus input energy at different pulse repetition rates

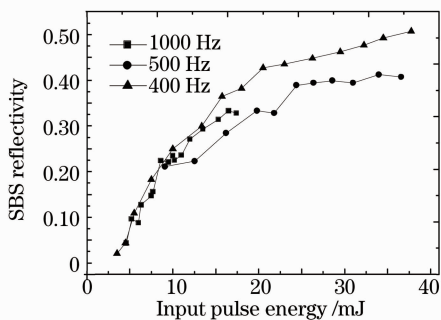


图 5 重复频率不同时,锥度光纤相位共轭镜反射率随注入能量的变化情况

Fig. 5 SBS reflectivity of the tapered fiber-conjugator versus input energy at different pulse repetition rates

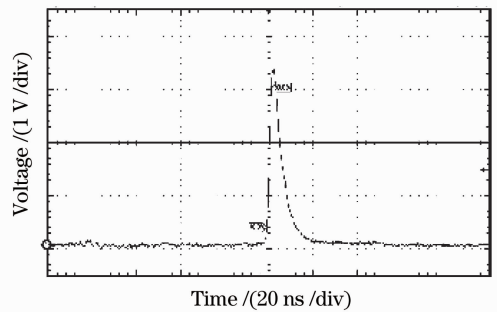


图 6 重复频率为 400 Hz 时, SBS 反射脉冲宽度
Fig. 6 Pulse width of the reflected SBS light with pulse repetition rate of 400 Hz

4 结 论

实验验证了大口径锥度光纤作为相位共轭镜在高重复频率高能量条件下可以获得超过 50% 的 SBS 反射率。实验研究了一条端面芯径由 1 mm 过渡到 400 μm 的锥度光纤在注入脉冲重复频率为 1000, 500 和 400 Hz 条件下的相位共轭特性,在注入单脉冲能量分别为 17.4, 36.6 和 37.75 mJ 条件下,分别获得了最高为 33.3%, 41.2% 和 50.7% 的 SBS 反射率。实验结果表明,相位共轭镜的反射率随着注入能量的增加而增加,其损伤阈值随脉冲重复频率的升高而降低。该实验结果对于实现带固体相位共轭镜的高重复频率大能量全固态 MOPA 激光系统具有一定的现实意义。

参 考 文 献

- 1 D. A. Rockwell. A review of phase-conjugate solid-state lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(6): 1124~1140
- 2 H. J. Eichler, A. Haase, O. Mehl. Solid state lasers with phase conjugation approaching the kW-range [C]. *SPIE*, 1998, **3264**: 9~17
- 3 H. J. Eichler, A. Dehn, A. Haase. Phase conjugation for improving the beam quality of solid state and excimer lasers [C]. *SPIE*, 1998, **3267**: 158~169
- 4 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
- 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
- 6 Zhu Chengyu, Lü Zhiwei, He Weiming *et al.*. Solid SBS media and entirely solidification of the SBS phase-conjugation mirrors [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(3): 65~68
朱成禹, 吕志伟, 何伟明 等. 固体 SBS 介质与 SBS 相位共轭镜的全固化 [J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(3): 65~68
- 7 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
- 8 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
- 9 Zhou Tao, Chen Jun. Analysis of stimulated Brillouin scattering in combined optical fiber[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(6): 547~550
周涛, 陈军. 组合型光纤相位共轭器的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(6): 547~550
- 10 Tong Lixin, Gao Qingsong, Chen Xiaolin *et al.*. Experimental study on high repetition rate quartz glass rod stimulated Brillouin scattering phase conjugation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(Suppl.): 144~146
童立新, 高清松, 陈晓琳等. 高重复频率熔融石英棒受激布里渊散射相位共轭实验研究[J]. 中国激光, 2006, **33**(增刊): 144~146
- 11 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. 熔融石英棒——光纤构成的新型复合相位共轭镜的实验和理论研究 [J]. 物理学报, 2008, **57**(3): 1719~1724
- 12 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
- 13 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. 熔融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
- 14 Wang Sha, Tong Lixin, Gao Qingsong *et al.*. LD pumped laser MOPA system with a phase conjugating mirror of a fused silicon rod [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(8): 1233~1236
汪莎, 童立新, 高清松等. 应用熔融石英棒相位共轭镜的 LD 泵浦激光 MOPA 系统[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(8): 1233~1236