

文章编号: 0258-7025(2005)04-0471-04

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

周 涛¹, 陈 军¹, 唐 淳^{1,2}, 庞 毓²

(¹浙江大学现代光学国家重点实验室, 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 锥度光纤作为相位共轭镜具有高反射率、高保真度等优点, 将 3 根自制的、规格不同的锥度光纤相位共轭镜应用在重复频率 100 Hz, 脉宽 28 ns 的激光二极管(LD)抽运的高功率脉冲激光主振荡功率放大器(MOPA)系统中, 对其受激布里渊散射(SBS)性能以及锥度区尺寸的影响进行了研究。结果表明, 芯径大于 400 μm 的大尺寸锥度光纤可以应用于高功率激光系统中, 如选择较长的后端光纤长度以及适当的锥度区规格可获得较高的受激布里渊散射能量反射率和输出能量。在应用总长 5.2 m, 锥度区从 $\phi 400 \mu\text{m}$ 过渡到 $\phi 200 \mu\text{m}$ 的锥度光纤时, 实验获得了高达 85% 的受激布里渊散射能量反射率和大于 21 mJ 的双通输出能量, 激光脉宽被压缩到 17 ns, 最大峰值功率达到兆瓦量级。

关键词 激光技术; 主振荡功率放大激光器; 相位共轭; 锥度光纤; 激光二极管抽运

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

Experimental Study on Optical Tapered Fiber Phase-conjugator in MOPA System

ZHOU Tao¹, CHEN Jun¹, TANG Chun^{1,2}, PANG Yu²

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

Abstract The tapered fiber as phase conjugator has the merits of high stimulated Brillouin scattering (SBS) reflectivity and high fidelity. In this paper, three self-designed tapered fibers with different dimensions were applied in a laser diode (LD) pumped high-power master oscillator power amplifier (MOPA) laser system operated at 100 Hz repetition-rate and 28 ns pulse width. Their SBS performances and influences of taper size on fiber phase-conjugator were experimentally studied. The results demonstrated that tapered fiber with core more than $\phi 400 \mu\text{m}$ can be used in high-power laser system, while higher output energy and SBS reflectivity can be achieved by using a fiber phase conjugator with optimum taper size and larger fiber length of thinner side. Applying a 5.2 m-long tapered fiber with taper from $\phi 400 \mu\text{m}$ down to $\phi 200 \mu\text{m}$, 85% energy reflectivity and 21 mJ output energy of double-pass can be obtained. The pulse width was compressed up to 17 ns, the peak power reached to MW.

Key words laser technique; master oscillator power amplifier laser; phase-conjugation; tapered fiber; laser diode pumped

1 引 言

多模石英光纤作为相位共轭镜可以显著降低受激布里渊散射(SBS)的阈值功率^[1]并获得较高的保真度^[2], 且具有小体积、全固化和无毒无污染等优点, 因此近年来被应用于高功率主振荡功率放大器(MOPA)激光系统中^[3~5]来改善激光器的光束质

量。然而迄今为止的实验报道中, 应用普通多模石英光纤作为相位共轭镜所获得的能量反射率仅在 50%~60% 之间^[6~8]。且在以上的众多实验中, 脉冲宽度均在 100 ns 以上。1998 年 A. Heuer 等^[9]首次提出了内锥度光纤相位共轭镜的概念来提高光纤受激布里渊散射性能, 通过 5 cm 长的锥度区将芯径

收稿日期: 2004-04-20; 收到修改稿日期: 2004-06-07

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(10376033)资助项目。

作者简介: 周 涛(1978—), 男, 陕西汉中, 博士研究生, 主要从事光学相位共轭研究。E-mail: zhj_zht@sohu.com

100 μm 和 20 μm 的两节光纤连接,并在 30 ns, 0.5 mJ 的小能量激光注入下获得了高达 95% 的能量反射率;但是锥度光纤应用于高功率激光系统中的报道较为少见。我们曾对锥度光纤中的受激布里渊散射过程建立了理论模型^[10],在此基础上对锥度光纤提高反射率的机理及其结构尺寸对受激布里渊散射性能的影响进行了分析和讨论,并优化了锥度光纤的外形尺寸,提出了采用大芯径和长过渡区的锥度以降低锥度光纤内的传输损耗、提高损伤阈值和相位共轭性能的设想。据此设想,本文通过应用自行设计的 3 根规格不同的锥度光纤于激光二极管抽运的主振荡功率放大器激光系统中,实验研究了锥度光纤的光纤参量对受激布里渊散射性能的影响。实验结果证实了规格适当的大芯径锥度光纤能够应用于激光二极管抽运的高功率激光系统中,并获得了高达 85% 的反射率和 21 mJ 的双通输出能量。

2 实验装置

实验应用了激光二极管抽运的 Nd:YAG 板条激光系统获得相位共轭镜的注入光脉冲,如图 1 所示。

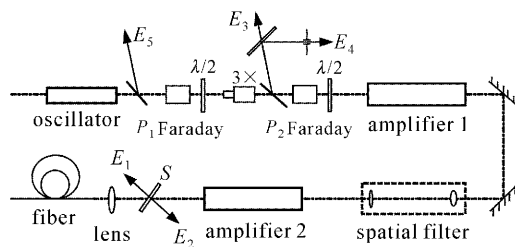


图 1 应用锥度光纤相位共轭镜的实验装置

Fig. 1 Experimental setup using optical tapered fiber phase-conjugator

振荡级中采用了泡克耳斯(Pockel)盒作为电光调 Q 元件,输出能量 1.7 mJ,脉宽 28 ns 的 TEM₀₀ 模 1064 nm 激光脉冲,重复频率为 100 Hz。并通过 2 mm 厚、两面镀有 50% 反射膜的标准具抑制纵模,提高输出激光的单色性。振荡级输出激光经过两级放大后,最大可获得的脉冲能量为 12 mJ,通过聚焦透镜注入到光纤相位共轭镜中。实验中测量了受激布里渊散射反射率、双通输出能量、保真度、退偏率等参量。为了测量相位共轭镜的反射率,在光路中放置玻璃片 S 作为分束采样。注入激光和相位共轭光的能量分别于 E₁ 和 E₂ 处测量而获得受激布里渊散射反射率。保真度的测量采用文献[2]中的

方式:在 P₂ 处放置一小孔,测出它对该位置振荡级激光的最大透过率 T,然后将小孔移至 E₄ 处,并调节小孔使 E₄ 最大,则保真度等于 E₄ 和 E₃ T 的比值;相位共轭光的退偏能量将从 E₅ 处测量,并由此计算退偏率。退偏率和保真度的精度由能量测量精度决定。实验中测量能量使用的是 LP-3C 型能量计,最小测量精度为 0.05 mJ。根据理论计算结果设计了 3 根不同规格的锥度光纤,它们的外形结构如图 2 所示。其中 L₁ 和 L₂ 分别为锥度区和小芯径端光纤的长度。3 根锥度光纤的规格分别为:(a) 锥度光纤 1;L₁=2 m;L₂=0 m;光纤芯径从 400 μm 过渡到 200 μm 。(b) 锥度光纤 2;L₁=1.7 m;L₂=3.5 m;光纤芯径从 400 μm 过渡到 200 μm 。(c) 锥度光纤 3;L₁=2.5 m;L₂=3 m;光纤芯径从 600 μm 过渡到 200 μm 。三者的数值孔径均为 0.37,在选择适当的透镜情况下,透镜与光纤的耦合效率均可达到 82% 以上。比较光纤 1 和 2 二者的受激布里渊散射性能可以说明小芯径端光纤的存在及其长度对相位共轭特性的影响,而比较光纤 2 和 3 的受激布里渊散射性能可以说明芯径差及过渡区长度对相位共轭特性的影响。为了反映锥度光纤受激布里渊散射性能与普通多模光纤的异同,实验中还进行了与长度 2.3 m 的 $\phi 200 \mu\text{m}$ 普通多模石英光纤的实验比较。

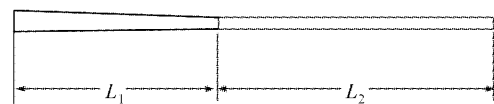


图 2 实验中应用的锥度光纤结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optical tapered fiber used in experiment

3 实验结果

实验中应用 3 根锥度光纤相位共轭镜,均观察到了相位共轭光的光束质量显著改善。在远高于阈值的情况下应用电荷耦合器件(CCD)探测激光光斑的截面强度分布,表明相位共轭光的光束质量都接近 TEM₀₀ 模,和振荡级输出激光光束质量相当。实验中主要测量了 3 根锥度光纤的受激布里渊散射反射率、双通输出能量、退偏率和保真度等参量随注入能量的变化趋势,并和 $\phi 200 \mu\text{m}$ 普通光纤的实验结果进行比较。

3.1 受激布里渊散射反射率和双通输出能量

图 3 和图 4 分别为应用 3 根锥度光纤和

$\phi 200 \mu\text{m}$ 普通光纤实验获得的受激布里渊散射反射率和双通输出能量曲线随注入能量的变化曲线。此时注入激光的脉宽为28 ns,重复频率为100 Hz。

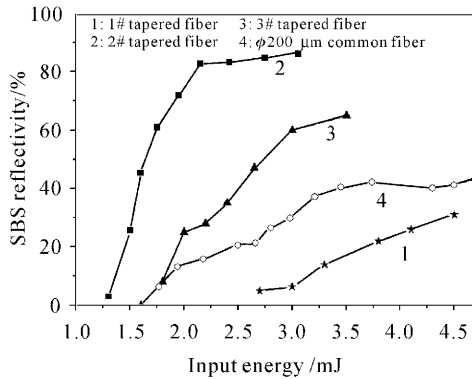


图3 反射率随着注入能量的变化趋势

Fig. 3 SBS reflectivity versus input energy

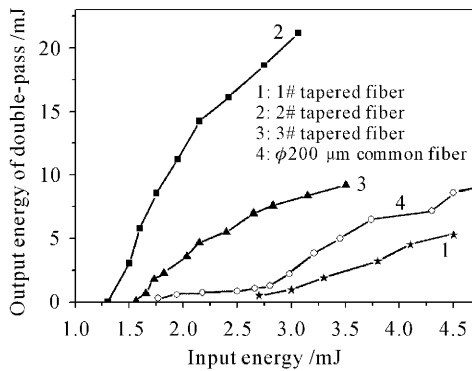


图4 双通输出能量随注入能量的变化趋势

Fig. 4 Output energy of double-pass versus input energy

从图3可见,锥度光纤1由于没有尾段光纤,其受激布里渊散射阈值2.7 mJ较 $\phi 200 \mu\text{m}$ 普通光纤阈值1.77 mJ高很多,所能获得的最大受激布里渊散射反射率为31%,相应双通输出能量为5.3 mJ。根据理论分析^[10],尾段光纤作为受激布里渊散射的发生池将在注入激光脉冲前沿为作为放大池的前端光纤提供相位共轭种子光,这是锥度光纤相位共轭镜性能提高的重要原因。光纤1缺少了尾段光纤,破坏了锥度光纤的双池结构,因此其性能介于芯径200 μm 和400 μm 的普通多模光纤之间。

而应用了长度3 m多的尾段光纤后,锥度光纤在本质上可以看成具有双池结构的相位共轭器,使得反射率增大而阈值降低。图3显示,锥度光纤2(锥度从400 μm 过渡到200 μm)的受激布里渊散射能量反射率大幅度提高,在2.1 mJ的注入能量下已达到80%以上的能量反射率,此后上升速度趋于缓慢。在光纤损伤前获得的最大反射率为85%,远比

相同注入能量下的普通多模光纤受激布里渊散射反射率高。而其受激布里渊散射阈值大幅度降低到1.37 mJ,低于 $\phi 200 \mu\text{m}$ 的普通光纤阈值。锥度光纤3(锥度从600 μm 过渡到200 μm)由于前端芯径较大,锥度区也长,锥度光纤3内的功率密度较锥度光纤2为低,因此它的受激布里渊散射阈值较锥度光纤2要高,为1.56 mJ。在3.5 mJ注入下获得的最大反射率为65%,低于锥度光纤2。但是仍呈现出较明显的上涨趋势。可见,锥度光纤的锥度段以及尾段的芯径与长度对受激布里渊散射的阈值以及反射率有着直接的影响。

锥度光纤2和3反射率的提高使得相应的双通输出能量有所增大,在损伤阈值附近获得的双通输出能量分别为21 mJ和9.2 mJ,输出脉宽从30 ns压缩到17 ns。最大峰值功率达到兆瓦量级。

光纤的材料直接影响到损伤阈值,亦即影响到其最大反射率。锥度光纤1,2和3是我们自行设计并在国内加工的。受到材质影响,在实验中测量得到的损伤能量阈值分别在3.06 mJ,3.5 mJ和4.5 mJ。而实验中采用的 $\phi 200 \mu\text{m}$ 普通光纤是选用3M公司的高损伤阈值的熔融石英材料,其损伤能量阈值为7 mJ。

3.2 退偏率和保真度

实验中还测量了3根锥度光纤和 $\phi 200 \mu\text{m}$ 普通多模石英光纤的退偏率和保真度随注入能量的变化,分别如图5和图6所示。

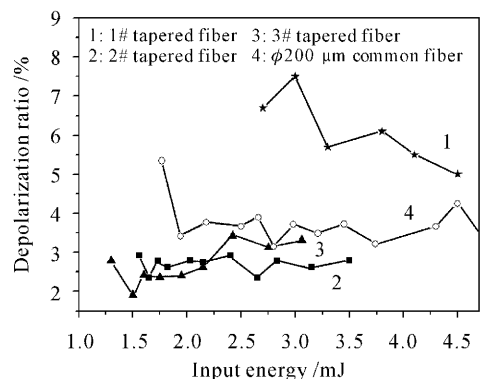


图5 退偏率随注入能量的变化趋势

Fig. 5 Depolarization versus input energy

从图5可见,锥度光纤2,3和 $\phi 200 \mu\text{m}$ 普通光纤的退偏率均比较接近,约在3%~4%之间,和光纤表面4%的非涅耳反射率相当。这说明,带有尾段的锥度光纤具有很好的保偏性能。而锥度光纤1的退偏率较大,在阈值附近为6.3%,随着注入能量的增大和反射率的提高呈现明显的下降趋势,并接

近于其他三者。由于退偏能量接近能量计的最小精度,退偏率的计算误差较大,造成图 5 中的曲线有较大波动。实际上,这种波动的绝对幅度仅在 2% 以内,可以忽略。

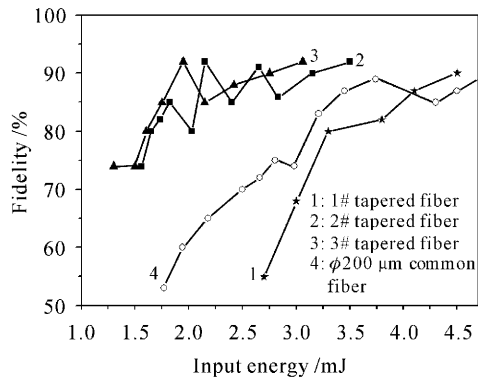


图 6 相位共轭保真度随注入能量变化曲线图

Fig. 6 Fidelity versus input energy

图 6 可见,在阈值附近时,每根光纤的保真度均小于临近损伤阈值时的保真度,但在注入能量增大以后均迅速提高,最终获得的保真度都在 90% 左右。由于相位共轭具有一定的随机性,在高重复频率下对注入激光的能量波动比较敏感,而 E_3 和 E_4 并非同时测量,使得图 6 中的数据曲线有较大波动,其中 3 根锥度光纤的实验数据为单次测量结果。

4 结 论

通过应用 3 根规格不同的锥度光纤相位共轭镜,就锥度光纤结构尺寸对受激布里渊散射反射率、退偏率和保真度的影响进行了实验研究和讨论分析,并和长 2.3 m 的 $\phi 200 \mu\text{m}$ 普通多模石英光纤相位共轭镜的实验结果相比较。结果表明,具有适当长度的尾段光纤以及合适的锥度区规格可以显著降低受激布里渊散射的阈值并提高受激布里渊散射能量反射率,同时退偏率会略有降低;在阈值附近的保真

度会有显著提高,而远高于阈值时,4 根光纤获得的保真度均在 90% 左右。实验中,应用总长 5.2 m,锥度区从 $\phi 400 \mu\text{m}$ 过渡到 $\phi 200 \mu\text{m}$ 的锥度光纤 2,在注入锥度光纤 3.06 mJ 的激光能量下获得了 85% 的能量反射率,经双通放大后获得 21 mJ 的输出能量,输出脉宽从 30 ns 压缩到 17 ns。最大峰值功率达到兆瓦量级。

参 考 资 料

- 1 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics [M]. 2nd edition, USA. Academic Press, 1995
- 2 H. J. Eichler, J. Kunde, B. Liu. Quartz fibre phase conjugators with high fidelity and reflectivity [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **139**: 327~334
- 3 V. I. Kovalev, R. G. Harrison. Diffraction limited output from a CW Nd:YAG master oscillator/power amplifier with fibre phase conjugate SBS mirror [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **166**: 89~93
- 4 Zhou Tao, Chen Jun, Tang Chun *et al.*. Fiber phase conjugation in laser diode-pumped, electrooptical Q-switched laser with double-pass amplifier [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 356~359
周涛,陈军,唐淳等. 激光二极管抽运电光调 Q 双通激光器中的光纤相位共轭 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 356~359
- 5 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
- 6 H. J. Eichler, J. Kunde, B. Liu. SBS phase conjugation in multimode quartz fibers [C]. *CLEO*, 1997. 114~115
- 7 H. J. Eichler, B. Liu, O. Wittler *et al.*. Saturation and oscillation of SBS reflectivity in fiber phase conjugators [C]. *Nonlinear Optics '98. Conference*, 1998. 337~338
- 8 H. J. Eichler, J. Kunde, B. Liu. Fiber phase conjugators at 1064-nm, 532-nm, and 355-nm wavelengths [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(8): 495~497
- 9 A. Heuer, R. Menzel. Phase-conjugating stimulated Brillouin scattering mirror for low powers and reflectivities above 90% in an internally tapered optical fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(11): 834~836
- 10 Chen Jun, Zhou Tao. Analysis of stimulated Brillouin scattering in combined multi-mode optical fiber by numerical solution [C]. *SPIE*, 2002, **4926**: 67~74