

文章编号: 1001-4322(2007)08-1233-04

应用熔石英棒相位共轭镜的 LD 泵浦激光 MOPA 系统

汪 莎¹, 童立新², 高清松², 刘 崇¹, 陈 军¹, 唐 淳²

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

摘 要: 用熔石英棒作为相位共轭镜材料,在 LD 泵浦的激光 MOPA 系统中实现了在 100 和 400 Hz 下的受激布里渊散射相位共轭。实验测得重复频率 100 Hz 时双通放大后的 x 和 y 方向的光束质量平方因子分别为 1.74 和 1.66,最大反射率达到 24.33%,脉冲宽度从 60 ns 压缩到 31.34 ns。重复频率 400 Hz 时双通放大后的 x 和 y 方向的光束质量平方因子分别为 2.10 和 2.12,脉冲宽度从 56.69 ns 压缩到 28.84 ns。

关键词: 相位共轭; 熔石英棒; 受激布里渊散射; MOPA 系统; 光束质量

中图分类号: TN248.13

文献标识码: A

自受激布里渊散射(SBS)现象被发现以来,在液体、气体和固体中的受激布里渊散射引起了人们极大的兴趣,人们就此作了广泛的研究。激光系统中,由于热透镜效应以及应力畸变等扰动的存在,特别是在高重复率运行的情况下,高功率激光器的光束质量往往会大幅度下降。SBS的相位共轭特性被用在激光系统中作为相位共轭镜(PCM),以此改善激光系统中的光束质量。但是由于液体和气体作为相位共轭镜的诸多弊端,特别是其大的毒性和使用中的不方便因素,使得液体及气体 SBS 相位共轭镜在商用高功率激光器中的应用,以及在野外使用的激光系统中受到很大的限制。而固体材料作为相位共轭镜由于其加工和使用中的稳定、便捷、可靠,以及对人体完全无害,使得对它的研究具有更大的应用前景。在 1964 年 R. Y. Chiao 就发现了熔石英中的 SBS 现象^[1]。而后,由于光纤具有较长的作用距离和较小的芯径,使其拥有较低的 SBS 阈值以及较高的反射率,被作为一种新的 SBS 相位共轭镜材料研究^[2-4]。但是,对于大功率高重复率的 LD 泵浦激光,过小的芯径又带来了极易损伤的缺点,使得它只能在小功率下使用^[5-6]。直到 1997 年,日本的 H. Yoshida 等人开始使用熔石英块进行了一系列的实验和理论分析^[7-10],熔石英作为 SBS 相位共轭镜用于高功率的固体激光器中成为了可能。但是 H. Yoshida 等人的实验是在单纵模 TEM₀₀ 以及较低的重复频率(10 Hz)下进行的,而在高重复频率下熔石英作为相位共轭镜会有什么样的实验现象,到目前为止,尚没有人进行过全面深入的实验研究。本文用熔石英棒作为相位共轭镜材料,在 LD 泵浦的激光 MOPA 系统中进行了进一步的研究,在 100 Hz 和 400 Hz 下实现了受激布里渊散射相位共轭。实验测量了不同重复频率下双通放大后 x 方向和 y 方向的光束质量平方因子 M_x^2 和 M_y^2 。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示。由振荡级发出的脉冲激光经过光隔离器后又二级放大,放大后的激光脉冲由透镜会聚在熔石英棒内。

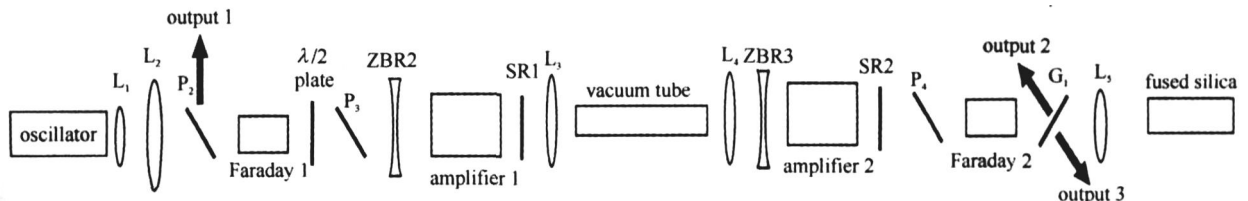


Fig. 1 MOPA system with fused silica rod as phase conjugated mirror

图 1 采用熔石英棒作为相位共轭镜的主振荡放大系统

* 收稿日期:2007-03-01; 修订日期:2007-07-13

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金资助课题(10376033)

作者简介:汪 莎(1982 →),女,博士生,主要从事激光与非线性光学方面的研究;anskina@hotmail.com, wind112@163.com。

通信作者:刘 崇(1978 →),chongliu78@hotmail.com。

装置中的激光振荡级如图 2 所示(即图 1 中 oscillator 部分)。M₁ 是对波长为 1 064 nm 的全反平凹镜, P₁ 为偏振片, ZBR1 为补偿镜。振荡级的输出镜采用标准具组结构, 由二个标准具组成, 标准具之间的空气间隙需保证二标准具高度平行。这样组成的标准具组整体等效反射率为 40%。使用了这样的标准具组后激光输出中的纵模个数减少, 提高了输出激光的相干长度, 以降低产生 SBS 的阈值, 提高 SBS 的反射率。

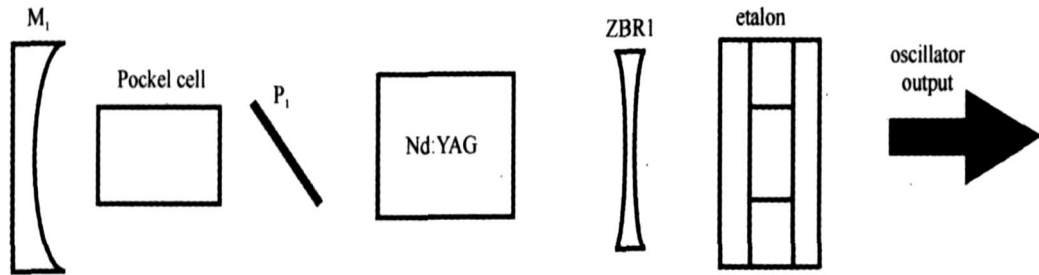


Fig. 2 Oscillator of MOPA System

图 2 MOPA 系统的振荡级

图 1 中的放大级由两根直径为 6 mm, 长 160 mm 的 Nd:YAG 棒(图 1 中 amplifier1, amplifier2) 构成。其中 L₁, L₂ 为扩束镜, 用来增大模式体积和提高放大级的放大效率。偏振片 P₂, P₃, 和法拉第旋光器(Faraday) 组成隔离器, 是为了防止由熔石英产生的相位共轭光经过双通放大后的光反向注入振荡级中, 造成对振荡级的破坏。22.5° 放置的 1/2 波片是为了改变偏振方向。透镜 L₃, L₄ 以及 SR1(90° 石英旋光片) 组成 4f 成像系统, 成为了像传递系统和空间滤波器, 一方面保证了相位共轭效应更完善, 另一方面用来消除放大级径向及切向热透镜效应上的差异。4f 系统的焦点应处于真空管中, 防止空气被高功率激光击穿。ZBR2 及 ZBR3 为补偿镜: 在 100 Hz 时分别用焦距为 -400 mm 及 -450 mm 的平凹镜; 在 400 Hz 时两处都采用焦距为 -350 mm 及 -300 mm 的平凹镜组。SR2 也是 90° 石英旋光片。output1 处放置 Spricon M-200 M² 仪用来测量系统的 M² 值等参数。通过两次放大后的激光通过 f = 410 mm 的透镜 L₅ 聚焦射入熔石英棒中。P₄ 和法拉第旋光器组合成隔离器。G₁ 为未镀膜的普通玻璃白片, 反射率为 1/11。在 output2 和 output3 处分别用功率计测量功率以计算 SBS 反射率, 并用 PIN 管和示波器观察这两处的波形以获得 SBS 入射光和出射光的波形。SBS 反射后的光斑可以在 P₄ 的反射处观察, 或者在 output1 处观察, 这是由于 SBS 反射光退偏后的部分泄漏光经过返回后的二级再放大, 一方面具有较大的能量, 另一方面也反映出二次通过放大级对放大级畸变的补偿作用, 观察其光斑质量更加有利。实验中使用的熔石英棒直径 30 mm, 长 200 mm。

2 实验结果

重复频率 100 Hz 下, 当入射能量到达 34 mJ 时, 达到熔石英产生 SBS 的阈值, 此时在偏振片 P₄ 的反射方向上可以看到闪烁的 SBS 反射光。在 output1 处用照相纸观察光斑, 发现双通放大后的光斑呈规律性的闪灭。这是由于输入功率在 SBS 阈值附近, 使得 SBS 反射还不稳定的原因。反射率随入射能量的增加而增加, 观察 output1 处的输出, 在 SBS 输入能量约为 51 mJ 时, SBS 反射光已经变得十分稳定, 也就是说输入功率已经远超过 SBS 阈值, 进入正常稳定的 SBS 过程。实验中我们从该值开始测量了不同输入能量下所对应的 SBS 反射率, 如图 3 所示。可以看到, 反射率随着泵浦功率增加而递增。这与大部分的 SBS 实验结果相似^[7-8]。当输入能量达到 60.1 mJ 时, SBS

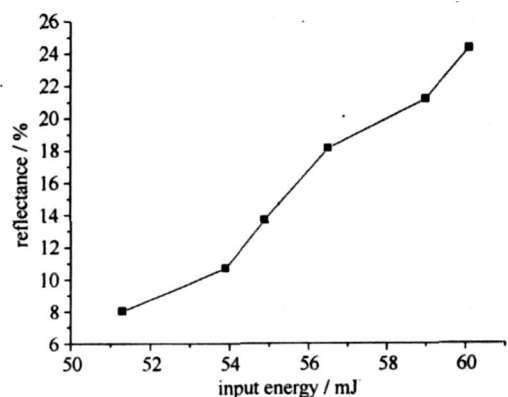


Fig. 3 SBS reflectance vs SBS input energy

图 3 SBS 反射率随 SBS 入射能量的变化趋势

反射率提高到 24.33%, 在稳定工作了 1 min 之后, 熔石英棒在焦点处出现损坏。在整个测量范围内没有观察到反射率饱和的现象。分析其原因, 是因为入射激光的重复频率和单脉冲能量都较大, 而且入射激光并不是严格的单纵模, 导致了石英棒中热量不断地集聚而得不到释放, 这势必影响石英棒的损坏阈值, 使之比小重复率单纵模泵浦情况下的值大为减小。特别是在正常工作了 1 min 左右的时间里, 热量的不断累积, 最终造成石英棒的损坏。实验的测量误差在 $\pm 5\%$ 。

使用 Spricon M-200 M² 仪, 在 output1 处测量了通过熔石英产生的部分相位共轭光通过两次放大后的

M^2 值,并采集了光斑图像,如图 4(a)所示。在不同的输入能量下测量得到的 M^2 值在误差范围内基本相等,在 x 方向的 M_x^2 为 1.74, y 方向的 M_y^2 为 1.66。为作比较,采用 0° 全反镜代替熔石英棒,在 output1 处测量得到 x 方向的 M_x^2 为 3.32, y 方向的 M_y^2 为 2.61,采集的光斑图像如图 4(b)所示。可以明显的看到,采用熔石英作为相位共轭镜大大改善了光束质量。

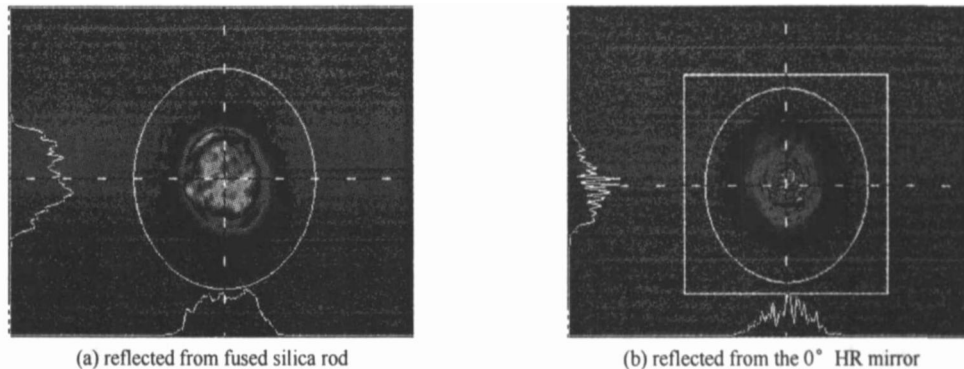


Fig. 4 Far field laser speckle after double-pass amplification

图 4 通过熔石英棒反射的和通过 0° 全反镜反射的双通放大后的远场光斑

实验中还使用示波器在 output2 处测量输入光的波形如图 5(a)所示,在 output3 处测量 SBS 反射光的波形如图 5(b)所示。由图可见,SBS 反射光的脉宽约为入射光脉宽的一半,脉冲被大大压缩,且 SBS 反射光脉冲上升沿比入射光陡峭很多。

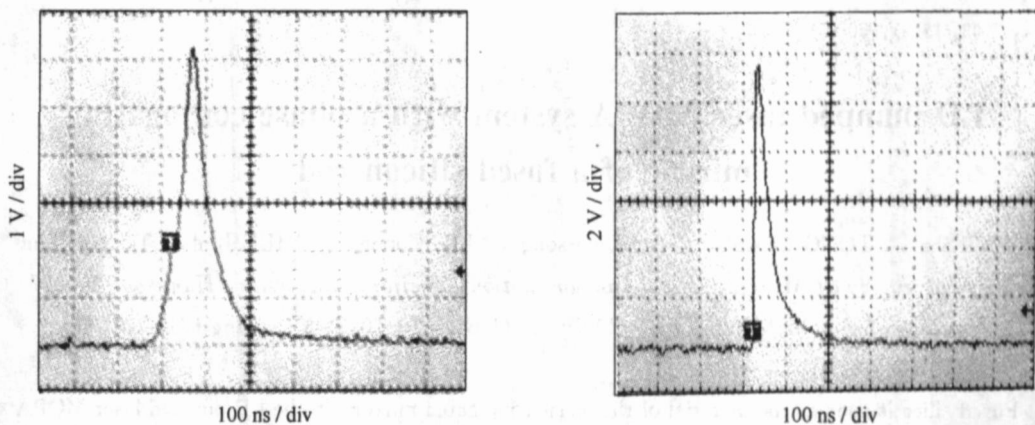


Fig. 5 Pulse shape of input laser and SBS output laser

图 5 输入激光和 SBS 输出激光的脉冲波形

在重复频率 400 Hz 下,当入射能量达到 35 mJ 的时候,我们观测到了微弱的 SBS 现象,与 100 Hz 时的 34 mJ 相比,可认为在误差范围内是相等的。也就是说,重复频率的变化对熔石英的 SBS 阈值影响不大。在入射能量为 46.1 mJ, 56 mJ 下测量的 SBS 反射能量分别为 0.56 mJ, 2.2 mJ, 对应 SBS 反射率分别为 1.2%, 3.9%。

同样,在 output1 处使用 Spricon M-200 M^2 仪测量了通过熔石英产生的部分相位共轭光通过两次放大后的 M^2 值,在 x 方向的 M_x^2 为 2.10,在 y 方向的 M_y^2 为 2.12。而采用 0° 全反镜代替熔石英,在 x 方向测量得到的 M_x^2 为 3.90,在 y 方向测量得到的 M_y^2 为 4.19。证明在高重复频率下使用熔石英作为相位共轭镜对提高光束质量有更重要的意义。而此时使用示波器观察的入射光脉宽为 56.69 ns, SBS 反射脉宽为 28.84 ns。与 100 Hz 时相同, SBS 反射脉冲的上升沿也很陡峭。

3 结 论

用熔石英棒作为相位共轭镜材料,在 LD 泵浦的激光 MOPA 系统中实现了 100 Hz 和 400 Hz 重复率下的相位共轭双通放大输出。在 LD 泵浦的激光 MOPA 系统中进行的实验研究表明,在高重复率高功率下,利用熔石英棒受激布里渊散射相位共轭改善光束质量是可行的。实验表明,反射率尚未达到饱和的情况下由于高重复率和较大的输入能量,出现了熔石英介质的损伤,使得反射率不能再提高。因此高重复率下的熔石英棒作为相位共轭镜材料的关键在于提高损伤阈值,只有提高 SBS 介质的激光损伤阈值,才能提高泵浦功率,也才有可能提高其反射率。而减少泵浦激光的纵模个数、提高其相干度,以及采用增大会聚点截面积等方式可能是有

效可行的方法。

参考文献:

- [1] Chiao R Y, Townes C H, Stoicheff B P. Stimulated Brillouin scattering and coherent generation of intense hypersonic waves[J]. *Phys Rev Lett*, 1964, **12**: 592-595.
- [2] Aoki Y, Tajima K. Stimulated Brillouin scattering in a long single-mode fiber excited with a multimode pump laser[J]. *J Opt Soc Am B*, 1988, **5**: 358-363.
- [3] Eggleston J M, Kushner M J. Stimulated Brillouin scattering parasitics in large optical windows[J]. *Opt Lett*, 1987, **12**: 410-412.
- [4] Cotter D. Observation of stimulated Brillouin scattering in low-loss silica fiber at 1.3 μm [J]. *Electron Lett*, 1982, **18**: 495-496.
- [5] Hill K O, Kawasaki B S, Johnson D C. CW Brillouin laser[J]. *Appl Phys Lett*, 1976, **28**: 608-609.
- [6] Ippen E P, Stojen R H. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Appl Phys Lett*, 1971, **21**: 539-541.
- [7] Hidetsugu Y, Hisanori F, Masahiro N. Stimulated Brillouin scattering phase-conjugated wave reflection from fused-silica glass without laser-induced damage[J]. *Opt Eng*, 1997, **36**(9): 2557-2562.
- [8] Hidetsugu Y, Hisanori F, Masahiro N, et al. Fused-quartz glass with low optical quality as a high damage-resistant stimulated Brillouin scattering phase-conjugation mirror[J]. *Opt Commun*, 2003: 257-267.
- [9] 郭少锋, 陆启生, 程湘爱, 等. 双谐激光场作用下 SBS 过程诱导的光学材料破坏[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(3): 229-233. (Guo S F, Lu Q S, Cheng X A, et al. Damage of optical materials induced by SBS process under biharmonic laser irradiation. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(3): 229-233)
- [10] 郭少锋, 陆启生, 程湘爱, 等. 后向受激布里渊散射诱导的光学材料破坏机理研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(9): 850-854. (Guo S F, Lu Q S, Cheng X A, et al. Theoretical study on damage induced by stimulated Brillouin scattering process. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(9): 850-854)

LD pumped laser MOPA system with a phase conjugating mirror of a fused silicon rod

WANG Sha¹, TONG Li-xin², GAO Qing-song², LIU Chong¹, CHEN Jun¹, TANG Chun²

(1. State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Institute of Applied Electronics, CAEP, P. O. Box 919-1013, Mianyang 621900, China)

Abstract: Fused silica is used as the material of the phase conjugated mirror. In the LD pumped laser MOPA system, phase conjugation through the stimulated Brillouin scattering is realized at the repetition frequency of 100 Hz and 400 Hz. At the repetition frequency of 100 Hz, the beam quality factor reached 1.74 in x direction and 1.66 in y direction after double-pass amplification. The highest reflectivity is 24.33% with the input energy of 60.1 mJ, the pulse duration is compressed from 60 ns to 31.34 ns. At the repetition frequency of 400 Hz, the beam quality factor reached 2.10 in x direction and 2.12 in y direction after double-pass amplification. The pulse duration is compressed from 56.69 ns to 28.84 ns.

Key words: Phase conjugation; Fused silica rod; Stimulated Brillouin scattering; MOPA system; Beam quality