

用于千赫兹高能量 MOPA 激光系统的大口径锥度 光纤相位共轭镜特性研究

赵智刚¹ 董延涛¹ 潘孙强¹ 葛剑虹^{1*} 刘崇¹ 陈军¹ 童立新² 崔玲玲² 高清松² 唐淳²

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

摘要 在 1000 Hz 高重复频率条件下,对单一大口径锥度光纤相位共轭镜(PCM)进行了详细的实验研究。对采用普通红宝石切割刀和进口 LDC-200 光纤切割刀切割的锥度光纤受激布里渊散射(SBS)反射率进行了比较,结果表明光纤表面切割好坏对反射率提升具有重要的影响。在两种抽运脉宽 24 ns 和 15 ns 下,对均由 LDC-200 光纤切割刀切割的锥度光纤 SBS 反射率进行了比较,在同样注入近 40 mJ 时,分别得到最高 70%和 50%的反射率。对抽运脉冲宽度为 15 ns 时,应用该锥度光纤 PCM 的双通输出激光能量、脉冲宽度、光束质量变化情况进行了测量,得到 42 mJ,脉宽约 1.5 ns 的双通输出,光束质量得到明显改善。

关键词 激光器;高重复频率;锥度光纤;受激布里渊散射;相位共轭镜

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0402007

Investigation on Characteristics of Large Aperture Tapered Fiber Phase Conjugation Mirror for kHz High Energy MOPA Laser System

Zhao Zhigang¹ Dong Yantao¹ Pan Sunqiang¹ Ge Jianhong¹ Liu Chong¹ Chen Jun¹
Tong Lixin² Cui Lingling² Gao Qingsong² Tang Chun²

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

Abstract With repetition rate of 1000 Hz, detailed experimental investigation on single large aperture tapered fiber phase conjugation mirror (PCM) has been done. Comparison of stimulated Brillouin scattering (SBS) reflectivity between tapered fibers incised by simple ruby cutter and imported LDC-200 fiber cutter is shown, which implies that the quality of fiber's end surface plays an important role in enhancing SBS reflectivity. For fibers incised by LDC-200 fiber cutter, comparison of SBS reflectivity with pump pulse widths of 24 ns and 15 ns is also given and maximum SBS reflectivities of 70% and 50% with pump energy about 40 mJ have been achieved respectively. Keeping the pump pulse width to 15 ns and applying the tapered fiber PCM, the double pass output energy, pulse width and beam quality are measured. 1000 Hz, 42 mJ, 1.5 ns laser output has been obtained and obvious beam quality improvement has been observed.

Key words lasers; high repetition rate; tapered fiber; stimulated Brillouin scattering; phase conjugation mirror

OCIS codes 060.4370; 070.5040; 290.5900; 140.3535

1 引 言

基于受激布里渊散射(SBS)的相位共轭镜

(PCM)在矫正激光放大器热畸变从而改善光束质量^[1]、脉宽压缩^[2~4]以及多光束合成^[5~7]等多个领

收稿日期: 2010-10-21; 收到修改稿日期: 2010-12-03

基金项目: 国家自然科学基金(60908013)资助课题。

作者简介: 赵智刚(1984—),男,博士研究生,主要从事激光与非线性光学等方面的研究。E-mail: zzg4298@163.com

导师简介: 陈军(1946—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事激光与非线性光学等方面的研究。

E-mail: chenjunl@zju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: jianhong@zju.edu.cn

域都具有重要的实际应用价值。SBS-PCM 经过近 40 年的发展,其介质形态已经从最初的气体、液体逐步过渡到更加安全实用的固体介质^[8]。

真正意义上的固体 SBS-PCM 始于 20 世纪 90 年代 Eichler 等^[9]对多模石英光纤的研究。在这之后相继出现了锥度光纤 SBS-PCM^[10]以及熔石英棒 SBS-PCM^[11,12],且均可达到超过 90% 的 SBS 反射率以及极高的保真度,但是所使用光源的脉冲重复频率均在 10 Hz 量级。近些年来,本课题组对固体 SBS-PCM 进行了深入的研究,系统研究了普通多模光纤 SBS-PCM^[13],锥度光纤 SBS-PCM^[14],熔石英棒 SBS-PCM^[15],光纤-熔石英棒复合结构 SBS-PCM^[16]以及大口径锥度光纤 SBS-PCM^[17],并在整个过程中逐步提升器件在高重复频率下的反射率性能。在这些已报道的有关固体 SBS-PCM 的文献中,其重复频率大多都在 1000 Hz 以下;在最近的文献^[17]中,本课题组报道了在 400 Hz 重复频率下超过 50% 以及在 1000 Hz 重复频率下超过 30% 的 SBS 反射率,但却因反射率不高而并不具有实用价值。另一方面,目前已报道的运行于千赫兹量级的 SBS-PCM 都是基于液体介质的^[18~20]。Offerhaus 等^[18]曾报道了应用基于 Freon-113 介质的 SBS-PCM 的主振荡功率放大器(MOPA)激光系统而得到 400 Hz,20 W 激光输出,并指出通过降低主振荡器的热透镜效应有可能实现 1000 Hz,50 W 的激光输出;Kiriya 等^[19,20]报道了应用基于 FC-75 介质的 SBS-PCM 的 MOPA 激光系统,得到了重复频率 1000 Hz,平均功率 360 W 的激光输出。目前还未

出现结果较好的千赫兹重复频率、基于固体 SBS-PCM 的 MOPA 激光系统的报道。实际上,无论是对于液体介质还是固体介质,重复频率的提升对 SBS-PCM 均有不利的影响:对于液体介质,重复频率提高以后会更容易发生光学击穿现象以及 PCM 长期运转反射率下降等问题^[21],通过对液体介质循环以及超高精度提纯等方法可以对该问题进行改善^[21,22],但系统不免变得庞大复杂;对于固体融石英介质,Yoshida 等^[11,12]也指出融石英 PCM 在高重复频率下运转时,更容易产生器件损伤阈值降低,对此童立新等^[15]在实验上予以证实,观察到融石英棒 SBS 反射率随重复频率的提升而逐渐降低的现象。

本文采用大口径锥度光纤作为固体 SBS-PCM,实现了该器件在千赫兹重复频率下的有效安全运转。对千赫兹重复频率下,锥度光纤的端面质量对 SBS 反射率的影响、抽运脉冲宽度对 SBS 反射率的影响及其在补偿激光放大器相位畸变、改善光束质量等方面的特性进行了详细的实验研究。最后还指出,通过合理优化实现 1000 Hz,100 mJ 高亮度激光输出的可能性。

2 实验装置

实验装置原理图如图 1 所示,SLM laser 为单纵模激光器,PD 为光电二极管,HWP 为 $\lambda/2$ 波片,BP-1~BP-5 为偏振片,Rot. 为 90° 石英旋光器,QWP 为 $\lambda/4$ 波片,L 为透镜。其中激光光源为一套单纵模 MOPA 激光系统。种子激光器为激光二极

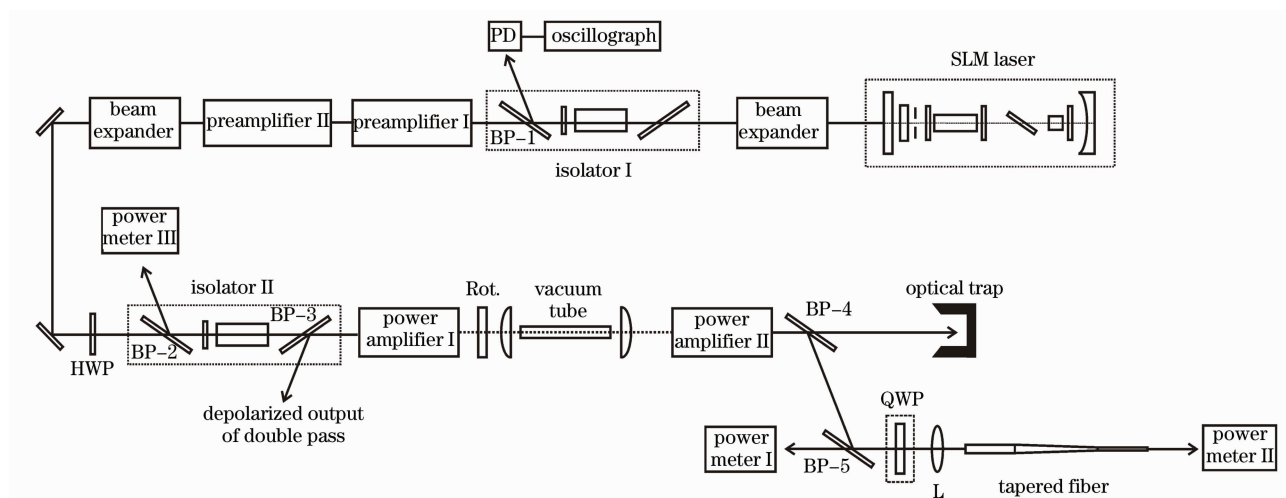


图 1 实验装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

管(LD)抽运的电光调 Q Nd:YAG 激光器,采用预激光技术获得稳定的单纵模激光输出,重复频率为 1000 Hz,输出功率为 1.2 W,光束质量因子 $M^2 < 1.2$ 。输出的激光束在通过光学隔离系统 I 时部分被 BP-1 反射出光路,由带宽大于 7.5 GHz 的超快光电探测器探测并由泰克公司的带宽为 1 GHz 的示波器显示。通过对其时间波形的实时监控来判断激光器是否处于单纵模运转:如果脉冲形状光滑,则表明此时为单纵模运转;如果脉冲出现调制结构,则表示多纵模运转。

从种子激光器出射的激光通过扩束装置和光学隔离器系统 I 后进入预放大器进行预放大。光学隔离器系统由两个对称放置的偏振片,45°法拉第旋光器和快轴 22.5°放置的 $\lambda/2$ 波片组成,用以实现预放大器和主振荡器之间的光学隔离。预放大器为两个峰值抽运功率达 700 W 的侧面抽运 Nd:YAG 抽运头。从预放大器输出的光束经由扩束装置耦合进入主放大器进行进一步放大。在扩束装置和主放大器之间,插入 $\lambda/2$ 波片和光学隔离器系统 II。其中 $\lambda/2$ 波片和 BP-2 组成的光强调节装置用以调节从预放大器出射进入主放大器的功率,进而控制主放大器单通之后的输出功率;光学隔离器系统则用于实现预放大器与主放大器之间的光学隔离。放大器也采用侧面抽运的 Nd:YAG 抽运头,峰值抽运功率达 2400 W。另外,为了有效消除主放大器中 Nd:YAG 晶体的退偏效应,在两个主放大器之间加入 90°石英旋光器和 4f 成像系统对其进行补偿。

从主放大器输出的光束被 BP-4 和 BP-5 反射后经由 $\lambda/4$ 波片和一个长焦透镜会聚进入锥度光纤,而退偏分量从 BP-4 处透射出光路。锥度光纤前端面直径为 1 mm,后端面直径为 400 μm 。当入射光的功率密度达到 SBS 阈值之后,SBS 发生。如图 1 所示,如果在 BP-5 之后插入 $\lambda/4$ 波片,由于两次通过该 $\lambda/4$ 波片,返回的 SBS 反射光偏振态发生改变,透过 BP-5,使用功率计 I 便可以方便地测量 SBS 反射功率 P_{SBS} ,再在透镜 L 和锥度光纤之间放入功率计测量入射到光纤的抽运功率 P_{P} ,这样便可方便地计算出 SBS 反射率 $\eta = P_{\text{SBS}}/P_{\text{P}}$ 。从光纤尾部输出的光束则由功率计 II 测量其功率。如果没有 $\lambda/4$ 波片,则返回的 SBS 反射光偏振态不发生改变,并由于相位共轭特性而沿原路返回再次进入主放大器提取能量,获得放大。双通放大的激光将从 BP-2 处输出,由功率计 III 测量其输出功率,而退偏分量则从 BP-3 处输出。

3 实验结果及分析

3.1 光纤表面质量对 SBS 反射率的影响

首先对由两种切割刀切割的光纤进行测试:1)由普通的红宝石切割刀切割;2)用进口的型号为 LDC-200 的大口径光纤切割刀切割。

图 2 给出抽运脉冲宽度为 24 ns 时,使用两种切割刀切割的锥度光纤 SBS-PCM 反射功率和反射率随注入光纤功率变化的情况。可见在注入光纤功率相同的条件下,使用 LDC-200 切割刀切割的光纤 SBS 反射功率较红宝石切割的光纤 SBS 反射功率有较大幅度的提升,且动态范围扩大了近 1 倍多,最高反射率也从 40% 提升到 70%,在注入功率分别为 40 W 和 17 W 时光纤表面被打坏。图 3(a)示出的是抽运脉宽为 24 ns 时,被打坏的由红宝石切割的光纤端面,可以清晰地看到中心被打坏的坏点、边缘被灼烧的痕迹以及明显的“D”字形分布;图 3(b)示出的是由 LDC-200 光纤切割刀切割好的光纤端面,表面十分均匀,画面中的黑点是在光纤表面附着的灰尘;图 3(c)示出的是抽运脉宽为 24 ns 时,被打坏的由 LDC-200 光纤切割刀切割的光纤端面,与图 3(a)相比有明显的不同。鉴于这种差别,在后面的实验中将主要对由 LDC-200 光纤切割刀切割的光纤进行讨论。

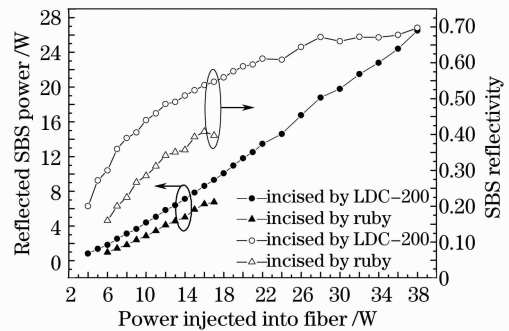


图 2 抽运脉宽 24 ns 时,用红宝石切割刀和 LDC-200 光纤切割刀切割后光纤 SBS 反射功率与反射率比较

Fig. 2 Comparison of reflected SBS power and reflectivity obtained with fibers incised by ruby and LDC-200, with a pump pulse width of 24 ns

3.2 抽运脉宽对光纤 SBS 反射率的影响

为了研究抽运脉宽对光纤 SBS 反射率的影响,选取两种抽运脉冲宽度 24 ns 和 15 ns 进行测试,且光纤均由 LDC-200 光纤切割刀切割。图 4 给出在这两种脉宽下,锥度光纤 SBS 反射功率和反射率随注入光纤功率的变化情况。在注入功率为 38 W 时,使用 24 ns 和 15 ns 抽运脉宽,分别可得到最高

26.5 W和 20 W 的 SBS 反射功率以及 70%和 50% 的 SBS 反射率。可见,使用较长的抽运脉宽可以获得更高的 SBS 反射功率和反射率,这与文献[23]对普通融石英光纤的研究结论一致。对于该现象可以

这样理解:如果脉宽逐渐增大至远超过所使用介质的声子寿命时,就属于稳态的 SBS 过程。而现有的理论已经证明:在稳态情况下,具有足够的光纤长度和抽运功率,理论上的反射率可以接近 100%。

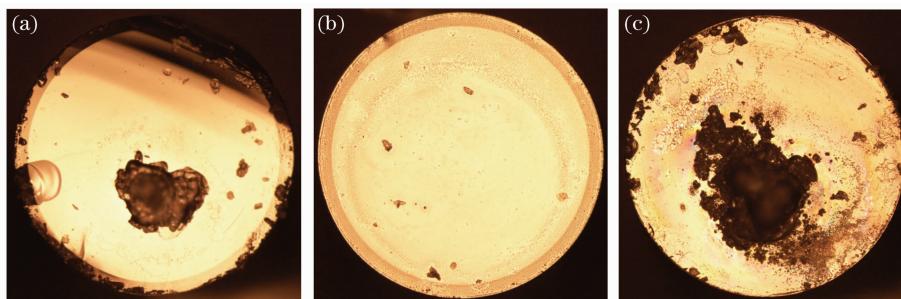


图 3 抽运脉宽 24 ns 时,打坏的由红宝石切割的光纤端面(a),由 LDC-200 光纤切割刀切割的光纤端面 (b)和打坏的 LDC-200 切割的光纤端面(c)

Fig. 3 Destroyed fiber end surface incised by ruby (a), fiber end surface incised by LDC-200 (b) and destroyed fiber end surface incised by LDC-200, with a pump pulse width of 24 ns

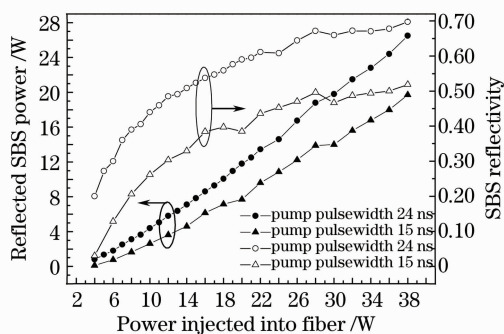


图 4 抽运脉宽 24 ns 和 15 ns 时,由 LDC-200 切割的光纤的 SBS 反射功率及其反射率

Fig. 4 Reflected SBS power and reflectivity of fiber incised by LDC-200, with pump pulse width of 24 ns and 15 ns

3.3 抽运脉宽为 15 ns 时双通放大结果及讨论

为了研究千赫兹重复频率下大口径锥度光纤 SBS-PCM 补偿激光放大器热畸变的性能,对该系统进行了双通放大实验,抽运脉宽采用 15 ns。实验时,先保持 QWP 插入在光路中,对 SBS 反射功率和光纤尾部透射功率进行测量;然后将 QWP 撤去实现双通放大,在 BP-2 处对双通输出功率进行测量,测量结果如图 5 所示。这里仅给出了抽运功率在 22 W 以下的测试结果,这是由于在实验中担心过高的抽运功率将光纤表面打坏而影响实验。不过,这些数据已经能基本反映出该器件功率方面的一些特性。还对抽运脉冲,SBS 反射脉冲及透过光纤尾部的剩余抽运脉冲以及双通之后的脉冲形状进行了测量,测试结果如图 6 所示。由图 6(a)可知抽运脉宽为 15 ns,且脉冲形状十分对称;图 6(b)为 SBS 反射

脉冲,主峰脉宽为 1.5 ns,上升沿极陡,压缩比达到 10:1;图 6(c)为透过光纤尾部的剩余抽运脉冲形状,脉宽约为 7 ns,整体形状与抽运脉冲的前半部分大致相同,而后半部分被反射,下降沿极陡,这与 SBS 反射脉冲的上升沿也相互吻合;图 6(d)为双通输出的脉冲形状,脉冲形状与图 6(b)极为相似,主峰脉宽也为 1.5 ns 左右。

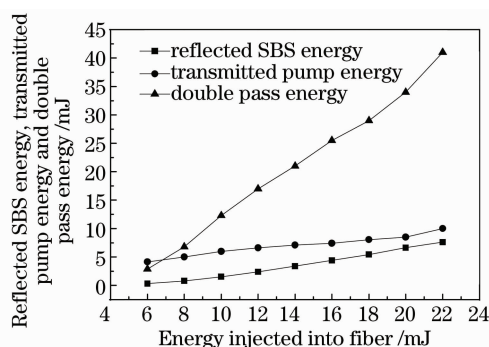


图 5 抽运脉宽为 15 ns 时,光纤 SBS 反射功率、透射功率以及双通功率随注入光纤功率的变化情况

Fig. 5 Reflected fiber SBS power, transmitted power and double pass power versus power injected into fiber, with pump pulse width of 15 ns

使用 Spiricon 公司的 M^2 -200 光束质量分析仪对进入主放大器的激光光束和应用相位共轭镜以后双通输出的激光光束的空间分布和光束质量进行测量,测试结果如图 7 所示。对于进入主放大器的光束,测得两个方向上的光束质量因子分别为 $M_x^2 = 2.68, M_y^2 = 2.50$;而对应用相位共轭镜后双通输出的光束,测得两个方向上的光束质量因子分别为 $M_x^2 = 2.30, M_y^2 = 2.24$ 。在实验中观察到应用相位

共轭镜之后的双通光束质量比进入主放大器光束的光束质量更好一点,这也就证明了相位共轭镜确实消除了激光放大器中的热畸变对光束质量的影响而达到了和入射光束接近的光束质量。如果对进入主放大器光束的光束质量进行优化,使其达到近衍射极限,那么应用此 SBS-PCM 之后也能达到近衍射极限的激光束输出。图 8 给出了用相纸采集的单通和双通之后的光斑情况,其中标签“功放 30 W”指的是从激光放大器输出进入光纤的功率为 30 W 时采集到的单通光斑,“双通 30 W”是指在该情况下去掉 QWP 而采集到的双通光斑。可见,双通光斑质量明显优于单通光斑质量,也证实了千赫兹重复频率

下锥度光纤 SBS-PCM 在矫正激光放大器热畸变、改善激光光束质量方面的功效。

使用 15 ns 抽运脉冲,在注入功率为 30 W 时,测得双通输出功率可达到 52 W,峰值功率高达 26 MW,对于更高的注入功率虽然没有测量双通输出功率,但是相信输出功率还有很大的上升空间。对于抽运脉宽为 24 ns 的情况,没有进行类似实验,但相信输出功率趋势是相同的,且根据之前的实验结果(3.1 节),在注入光纤近 40 W 功率时,返回的 SBS 功率可达 27 W。因此在使用 24 ns 或者更长的抽运脉宽实现双通之后的输出功率预计可达百瓦量级,也就是实现千赫兹、百毫焦近衍射极限的激光输出。

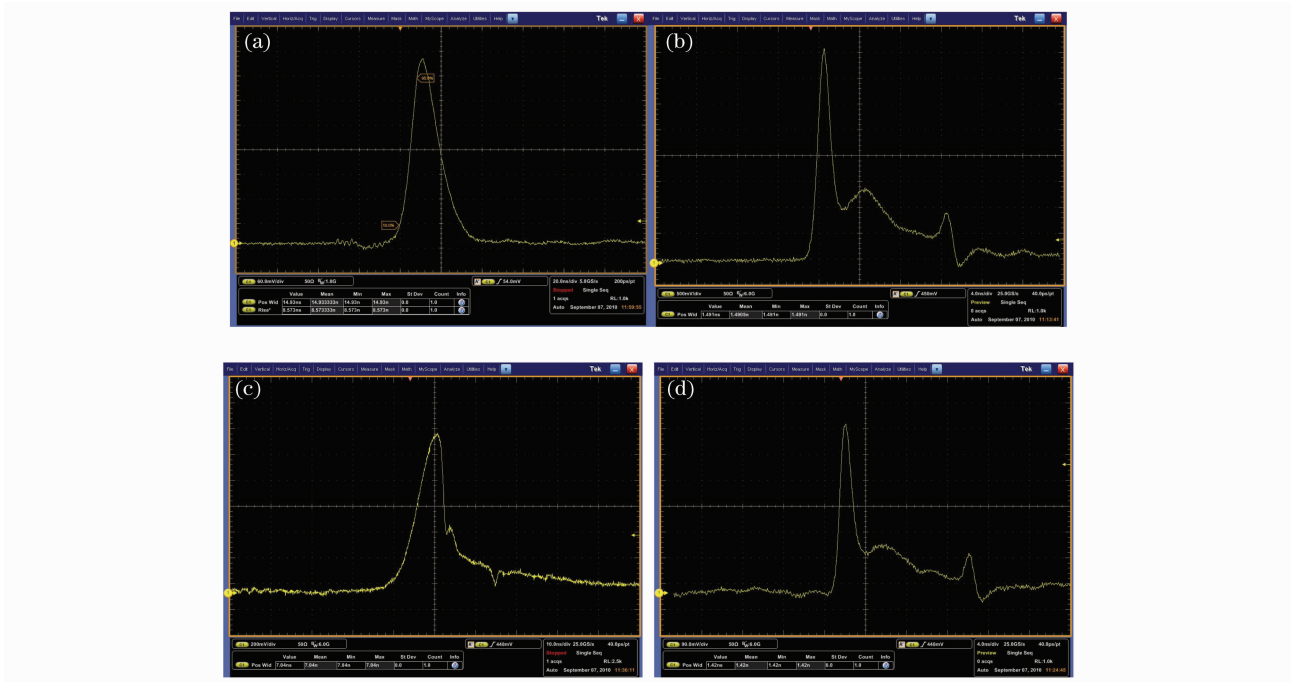


图 6 抽运脉宽为 15 ns 时,抽运脉冲(a),SBS 脉冲(b),透射脉冲(c)和双通脉冲(d)的形状

Fig. 6 Shape of pump pulse (a), SBS pulse (b), transmitted pulse (c) and double pass pulse (d), with pump pulse width of 15 ns

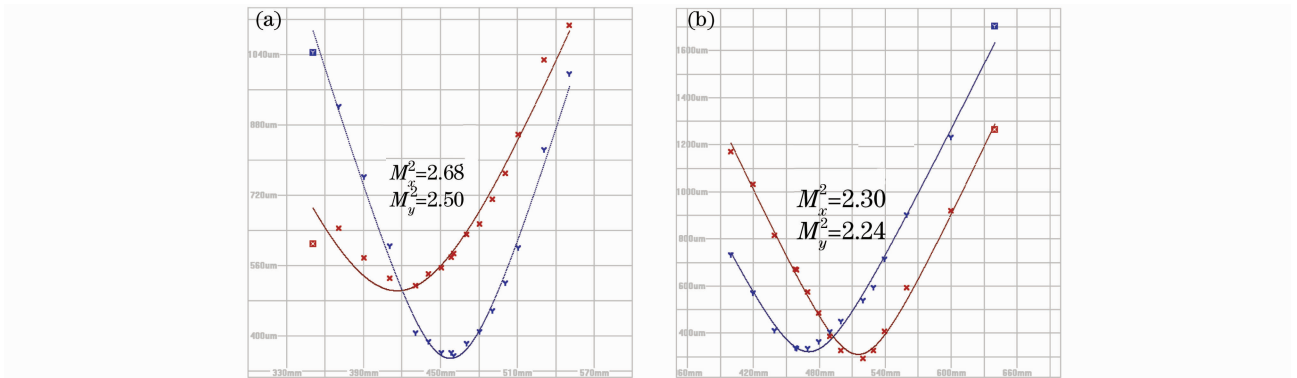


图 7 预放后(a)和双通后(b)的激光光束质量

Fig. 7 Beam quality of laser after pre-amplifiers (a) and double pass (b)



图 8 不同功率下相纸采集的光斑图

Fig. 8 Beam profiles collected by printing paper under different pump powers

4 结 论

对千赫兹高重复频率条件下的大口径锥度光纤全固态 SBS-PCM 的各种特性进行了详细的实验研究,从实验上探讨了光纤表面切割质量、抽运脉冲宽度等对其反射率特性的影响,并对其在补偿激光放大器相位畸变、改善光束质量等方面的特性进行了研究。在 1000 Hz 重复频率和 38 mJ 入射能量下,实现了锥度光纤 PCM 最高 70% 的 SBS 反射率;并证明其在补偿激光放大器相位畸变方面的功效。预计通过采用更长的抽运脉宽和更好光束质量的主激光光束,可实现 1000 Hz, 100 mJ 高亮度激光输出,最终达到应用液体 SBS 介质的水平。

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 David T. Hon. Pulse compression by stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(12): 516~518
- 3 M. J. Damzen, M. H. R. Hutchinson. High-efficiency laser-pulse compression by stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt. Lett.*, 1983, **8**(6): 313~315
- 4 V. Babin, A. Mocofanescu, V. I. Vlad *et al.*. Analytical treatment of laser-pulse compression in stimulated Brillouin scattering [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(1): 155~163
- 5 M. Valley, G. Lombardi, R. Aprahamian. Beam combination by stimulated Brillouin scattering [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(10): 1492~1497
- 6 Hong Jin Kong, Jin Woo Yoon, Jae Sung Shin *et al.*. Long-term stabilized two-beam combination laser amplifier with stimulated Brillouin scattering mirrors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(2): 021120
- 7 Jae Sung Shin, Sangwoo Park, Hong Jin Kong *et al.*. Phase

- stabilization of a wave-front dividing four-beam combined amplifier with stimulated Brillouin scattering phase conjugate mirrors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(13): 131116
- 8 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
- 9 H. J. Eichler, J. Kunde, B. Liu. Quartz fiber phase conjugators with high fidelity and reflectivity [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **139**(4-6): 327~334
- 10 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
- 11 H. Yoshida, H. Fujita, M. Nakatsuka *et al.*. Stimulated Brillouin scattering phase-conjugated wave reflection from fused-silica glass without laser-induced damage [J]. *Opt. Eng.*, 1997, **36**(9): 2557~2562
- 12 H. Yoshida, H. Fujita, M. Nakatsuka *et al.*. Fused-quartz glass with low optical quality as a high damage resistant stimulated Brillouin-scattering phase conjugation mirror [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **222**(1-6): 257~267
- 13 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
- 14 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
- 15 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** (suppl.): 144~146
- 16 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
- 17 Tong Lixin, Cui Lingling, Xie Gang *et al.*. Experimental investigation on characteristics of tapered fiber phase-conjugator with high repetition rate and high pulse energy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2361~2365
童立新, 崔玲玲, 谢刚等. 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 [J]. 中国激光, 2010, **37**(9): 2361~2365
- 18 H. L. Offerhaus, H. P. Godfried, W. J. Witteman. All solid-state diode pumped Nd:YAG MOPA with stimulated Brillouin phase conjugate mirror [J]. *Opt. Commun.*, 1996, **128**(1-3): 61~65
- 19 H. Kiriya, K. Yamakawa, T. Nagai *et al.*. 360-W average power operation with a single stage diode pumped Nd:YAG amplifier at a 1 kHz repetition rate [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(18): 1671~1673
- 20 H. Kiriya, K. Yamakawa. Development of high-repetition-rate LD pumped Nd:YAG laser and its application [J]. *Laser Physics*, 2006, **16**(4): 666~672
- 21 Y. L. Wang, Z. W. Lu, Y. Li *et al.*. Investigation on high power phase compensation of strong aberrations via stimulated Brillouin scattering [J]. *Appl. Phys. B*, 2010, **99**(1-2): 257~261
- 22 V. Kmetik, H. Fiedorowicz, A. A. Andreev. Reliable stimulated Brillouin scattering compression of Nd:YAG laser pulses with liquid fluorocarbon for long-time operation at 10 Hz [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(30): 7085~7090
- 23 Zhou Tao. Theoretical and Experimental Research on Optical Fiber Phase-Conjugator [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2003, 44~46
周涛. 光纤相位共轭技术的理论与实验研究 [D]. 浙江: 浙江大学, 2003. 44~46