

文章编号: 0258-7025(2007)09-1212-05

熔石英棒和光纤构成的新型复合型 相位共轭镜

汪莎¹, 陈军¹, 童立新², 高清松², 刘崇^{1*}, 唐淳²

(¹ 浙江大学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 提出一种使用熔石英棒和光纤构成的新型复合型相位共轭装置,并在实验中得以实现。这种组合将具有高的激光损伤阈值的大直径熔石英棒和具有较低的受激布里渊散射(SBS)阈值的光纤结合在一起,构成了振荡-放大形式的双池式受激布里渊散射结构,使得从光纤受激布里渊散射反射的斯托克斯光注入到熔石英介质中形成了强迫受激布里渊散射过程。在这种机制下,该复合型相位共轭镜较之单块熔石英棒、单根光纤或组合芯径光纤这三种形式的相位共轭镜,具有更低的受激布里渊散射阈值和更高的受激布里渊散射反射率,而且可以在较高的输入功率下运行。实验中将其用于高重复频率高功率的激光二极管(LD)抽运激光主振荡放大(MOPA)系统中,在100 Hz重复频率下获得了42.05%的反射率,并且获得了很好的光束质量,光束质量因子 M^2 值从输入光束的3减少到1.6,反射光斑稳定。在400 Hz下光束质量因子 M^2 值达到1.7。

关键词 激光技术;复合型相位共轭镜;受激布里渊散射;光束质量;熔石英;光纤

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

New Combined Phase Conjugator Consisting of Fused Silicon Rod and Optical Fiber

WANG Sha¹, CHEN Jun¹, TONG Li-xin²,
GAO Qing-song², LIU Chong¹, 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 A new type of combined phase conjugator consisting of a fused silicon rod and an optical fiber is realized in experiment. This conjugator combines a large diameter fused silicon rod with high laser damage threshold and a fiber with a low stimulated Brillouin scattering (SBS) threshold. The composed SBS oscillator-amplifier construction of the two cells type makes a forced SBS process, in which the Stokes beam reflected from fiber injects in the fused silicon rod. According to this mechanism the combined phase conjugating mirror possesses lower SBS threshold and higher reflectivity than the conjugator with bulk fused silicon, single optical fiber or combined fiber. It can also be used in a high power laser system. In a laser diode (LD) pumped high power high repetition rate master oscillator power amplifier (MOPA) laser system with the proposed conjugator, 42.05% reflectivity under 100 Hz was obtained with high beam quality. The beam quality parameter M^2 was reduced from 3 to 1.6 and the beam spot was stable. Under 400 Hz repetition the beam quality parameter M^2 reached 1.7.

Key words laser technique; combined phase conjugator; stimulated Brillouin scattering; beam quality; fused silica; fiber

收稿日期:2007-03-07; 收到修改稿日期:2007-04-13

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:汪莎(1982—),女,四川人,博士研究生,主要从事激光与非线性光学方面的研究。

E-mail: wind112@163.com

导师简介:陈军(1946—),女,浙江人,教授,博士生导师,目前研究方向为非线性光学、固体激光器。

E-mail: chenjun1@zju.edu.cn

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

1 引 言

激光二极管(LD)抽运的高功率固体激光器具有高重复频率、全固化的优势,近年来发展迅速,成为新一代固体激光系统。其重复频率从传统的几十赫兹提高到了百赫兹甚至千赫兹的量级。随之带来的是在如此高重复频率下严重的激光介质热透镜效应和应力畸变等干扰。受激布里渊散射(SBS)是一种产生光束相位共轭、有效补偿热透镜效应的方法^[1]。自熔石英材料中的受激布里渊现象被发现以来^[2],由于其具有加工和使用中的稳定、便捷、可靠,以及对人体完全无害等液体和气体不能相比的优点,使得对熔石英作为相位共轭镜有了广泛的研究。熔石英作为相位共轭介质有石英光纤和熔石英块两种形式,其各具优点和缺点。由于光纤具有较长的作用距离和较小的芯径,作为受激布里渊散射介质具有较低的受激布里渊散射阈值以及较高的反射率^[3,4]。但是,对于大功率高重复频率的激光二极管抽运激光,过小的芯径又带来了极易损伤的缺点,所以目前无论是单根光纤还是不同芯径的组合光纤作为相位共轭镜的实验都是在高重复频率、低输入功率下进行的^[5~9]。大块熔石英相对于光纤而言,其直径可以做得很大,由此通过增大激光在熔石英棒中的会聚点面积而提高其损伤阈值。但是这样做的同时却又带来了较高受激布里渊散射阈值的缺点。因此,尽管有文章在理论上进行了推导^[10],但是到目前为止的熔石英块相位共轭镜实验都是在低重复频率下进行的^[10~12]。本文提出使用熔石英棒和光纤共同作为复合型相位共轭镜,构成了振荡-放大形式的双池式受激布里渊散射结构^[13,14],使得从

光纤受激布里渊散射反射的斯托克斯光注入到熔石英介质中形成了强迫受激布里渊散射过程。实验证明相比于熔石英棒,复合型相位共轭镜具有更低的受激布里渊散射阈值、更高的受激布里渊散射反射率。

2 实验装置

图 1 为利用熔石英棒和光纤构成的复合型相位共轭镜产生受激布里渊散射相位共轭光的实验装置。由激光二极管抽运的 Nd:YAG 电光调 Q 振荡级激光,通过二级放大后输出。偏振片(P_1)及法拉第旋光器(Farady rotator)是为了防止二次放大后的激光注入振荡级中造成对振荡级的损坏。二级放大的 Nd:YAG 棒(A_1, A_2)直径 6 mm,长 160 mm。图中 L_1, L_2 , 真空管(vacuum tube)及 90° 石英旋转片(QR)组成像传递系统。 G_1 为未镀膜的普通玻璃片,用于测量受激布里渊散射反射率,该玻璃片的反射率为 9%。 L_3 是焦距为 410 mm 的凸透镜,将入射光聚焦进直径 30 mm,长 200 mm 的熔石英棒中。 L_4 是焦距为 200 mm 的凸透镜,直径为 600 mm,长 2 m 的多模石英光纤放在凸透镜 L_4 的焦点之后,通过熔石英棒的光由 L_4 耦合进入光纤中。在 Output1 和 Output2 处分别用功率计测量功率以计算该复合型相位共轭镜的受激布里渊散射反射率。复合型相位共轭镜获得的受激布里渊散射后向散射光反向进入放大级 1 和 2,进行第二程放大后从偏振片 P_2 (Output3)处输出。由放大级引起的热透镜效应及其他相位畸变,在光束第二次通过后得到消除,从而提高输出光的光束质量。

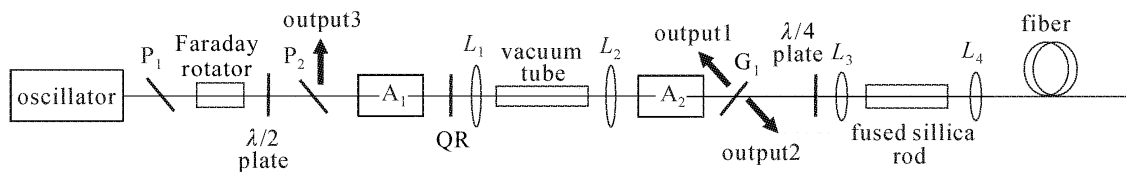


图 1 复合型相位共轭镜实验装置

Fig. 1 Experimental setup of combined phase conjugator

3 实验结果

3.1 重复频率 100 Hz 下的实验情况

在入射激光重复频率为 100 Hz 时,分别在使用复合型相位共轭镜、单石英棒及单光纤作为相位共轭镜的三种情况下进行了测量。如果以熔石英棒及光纤作为复合型相位共轭镜,当振荡级的输入电流

为 59.1 A,测得输入抽运光功率为 25.2 mJ 时,已到达受激布里渊散射的阈值。而此时仅用熔石英棒作为相位共轭镜,则没有受激布里渊散射现象。继续增大输入光功率,直到输入光功率为 33.2 mJ 时,对应于复合型相位共轭镜受激布里渊散射反射率达到了 31.5% 时,才能在挡住光纤后观察到熔石英棒较为稳定的受激布里渊散射现象,可见复合型相位共

镜的受激布里渊散射阈值远远低于只有熔石英棒的情况。继续加大振荡级的输入电流,在不同入射激光能量下测量并计算了复合型相位共轭镜和仅有熔石英棒两种情况下的受激布里渊散射反射率,如图 2 及表 1 所示,实验误差大约在±5%左右。

由表 1 可知,在入射能量为 41.9 mJ 时尚未发现任何损伤现象出现,而此时复合型相位共轭镜的受激布里渊散射反射率已达到42.05%,单熔石英棒的受激布里渊散射反射率仅有 32%。

不同抽运能量下,输入激光与复合型相位共轭镜反射后的脉宽在表 1 中给出。图 3 为入射能量 29.8 mJ 时的情况,经过复合型相位共轭镜反射,脉冲宽度从输入的 62.48 ns 压缩了近一半至 31.34 ns。而由表 1 中的经复合型相位共轭镜反射后的脉宽数

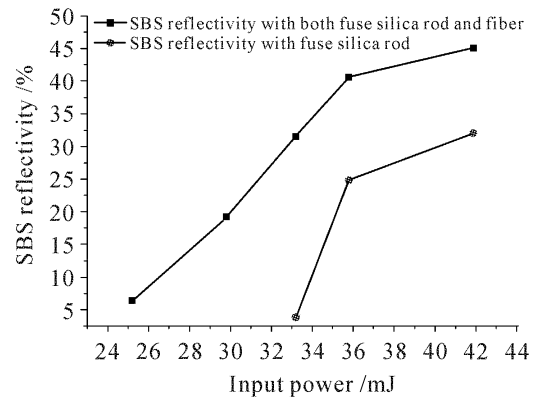


图 2 重复频率 100 Hz 时复合型相位共轭镜及仅有石英棒两种情况下的受激布里渊散射反射率
Fig.2 SBS reflectivity with both combined phase conjugator and only fused silica rod under repetition frequency of 100 Hz

表 1 复合型相位共轭镜及熔石英棒两种情况下实测受激布里渊散射反射率及脉宽
(重复频率 100 Hz,耦合透镜 $f=410$ mm,二级放大电流 $I_{a1}=I_{a2}=90$ A)

Table 1 SBS reflectivity and pulse width of combined phase conjugator and fused silica rod
(repetition frequency 100 Hz, coupling lens $f=410$ mm, amplifier current $I_{a1}=I_{a2}=90$ A)

| Oscillator current /A | Pump laser energy /mJ | SBS reflectivity with fused silica rod /% | SBS reflectivity with combined phase conjugator /% | Pump laser pulse width /ns | SBS with combine phase conjugator pulse width /ns |
|-----------------------|-----------------------|---|--|----------------------------|---|
| 59.1 | 25.2 | No reflectivity | 6.45 | 68.82 | 31.28 |
| 59.5 | 29.8 | No reflectivity | 19.2 | 62.48 | 31.34 |
| 60.0 | 33.2 | 3.5 | 31.5 | 60.00 | 32.56 |
| 60.5 | 40.3 | 24.8 | 40.6 | 50.73 | 32.94 |
| 61.5 | 41.9 | 32 | 42.05 | 61.43 | 30.40 |

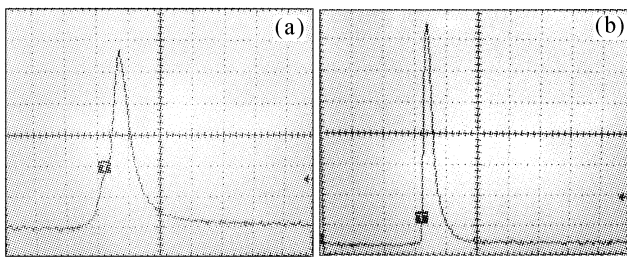


图 3 入射激光(a)和复合型相位共轭镜的受激布里渊散射反射(b)后的脉宽

Fig.3 Pulse width of input laser (a) and reflected SBS output with combined phase conjugator (b)

据可知输入激光功率对受激布里渊散射反射脉宽的影响不大。

在 Output3 处使用照相纸分别记录了复合型相位共轭镜和单使用熔石英棒作为相位共轭镜的情况下受激布里渊散射反射光斑,如图 4 所示。可以看到入射能量在 40 mJ 以上时,复合相位共轭镜有很稳定的受激布里渊散射反射,光斑整齐、规则、无漏脉冲现象。

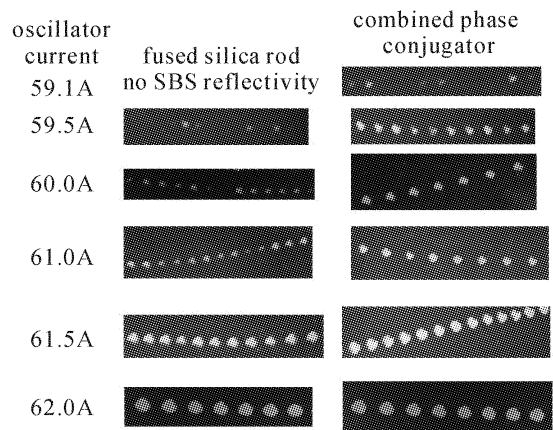


图 4 重复频率 100 Hz 时使用复合型相位共轭镜和熔石英棒两种情况下实测受激布里渊散射反射光斑
Fig.4 SBS laser speckle of combined phase conjugator and fused silica rod under repetition frequency of 100 Hz

受激布里渊散射反射光再次通过两根 Nd:YAG 放大级棒后,使用 Spricon M-200 M^2 测量仪在 Output3 处测量 M^2 值并记录远场的光斑形状。由实验结果可知,不同入射能量对 M^2 值的影响不

大,在入射能量为40.3 mJ时,若采用复合型相位共轭镜,测得 x 方向的 M_x^2 为1.75, y 方向的 M_y^2 为1.67;若挡住光纤,只有熔石英棒时, x 方向的 M_x^2 为1.73, y 方向的 M_y^2 为1.66。这在误差范围内可以认为是相等的。由此可见,在100 Hz的情况下采用复合型相位共轭镜对 M^2 的影响并不大。图 5 为由 Spricon M-200 M^2 测量仪记录的双通放大后的远场光斑,其中图 5(a)为采用复合型相位共轭镜的情况下通过双通放大后的远场光斑,图 5(b)为仅有熔石英棒的情况下通过双通放大后的远场光斑,图 5(c)为用 0° 全反镜代替相位共轭镜采集的光斑图像。此时测量得到 x 方向的 M_x^2 为3.32, y 方向的 M_y^2 为2.61。

图 6 给出了使用复合型相位共轭镜,单独使用相对应的石英棒和单独使用光纤下获得的受激布里渊

渊散射反射率的比较。相比使用复合型相位共轭镜的情况,虽然只用光纤的情况受激布里渊散射阈值降低了,但是相同入射激光能量下相对应的受激布里渊散射反射率也较低,当能量加至44 mJ时,光纤损坏。

3.2 重复频率 400 Hz 下的实验情况

重复频率 400 Hz 的情况下,分别在使用复合型相位共轭镜和熔石英棒作为相位共轭镜的两种情况下进行了实验。图 7 为振荡级的重复频率加至 400 Hz 时测量得到的复合型相位共轭镜及熔石英棒的受激布里渊散射反射率,当入射能量为 20.6 mJ 时就观察到了复合型相位共轭镜的受激布里渊散射现象。倘若只使用熔石英棒作为相位共轭镜,入射能量在 43.1 mJ 时才达到受激布里渊散射阈值。

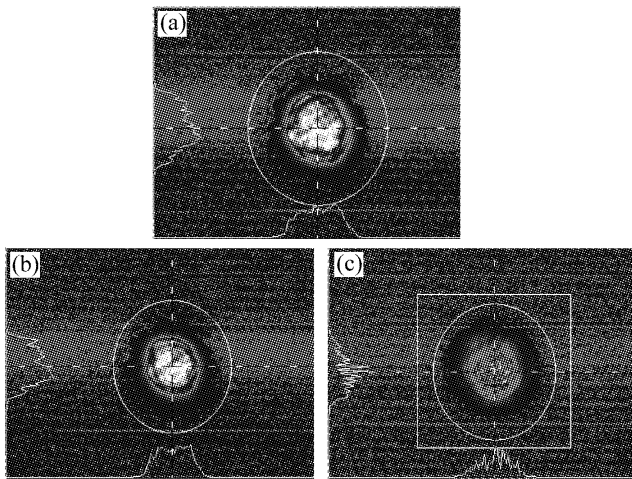


图 5 双通放大后的远场光斑

(a) 复合型相位共轭镜;(b) 仅有熔石英棒;(c) 0° 全反镜

Fig. 5 Far field laser speckle after double-pass amplification

(a) combined phase conjugator;

(b) fused silica rod; (c) 0° total reflection mirror

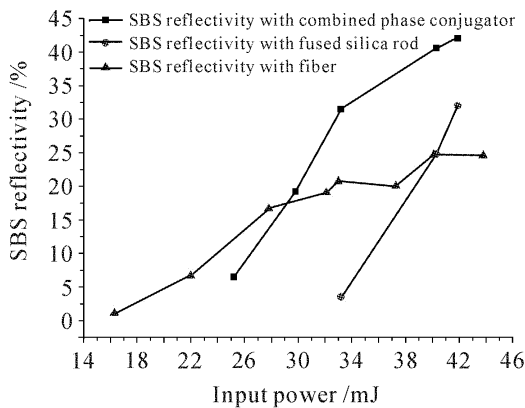


图 6 重复频率 100 Hz 时光纤作为相位共轭镜的受激布里渊散射反射率

Fig. 6 SBS reflectivity with fiber as phase conjugator of repetition frequency of 100 Hz

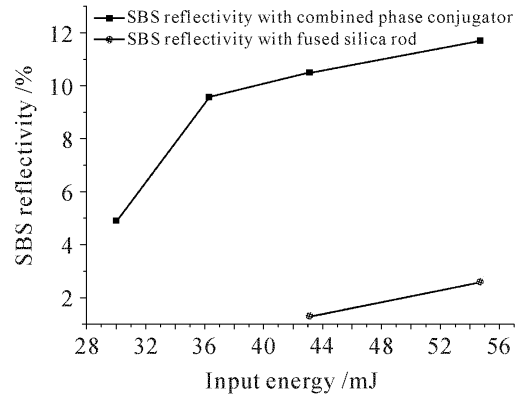


图 7 重复频率 400 Hz 时复合型相位共轭镜及石英棒的受激布里渊散射反射率

Fig. 7 SBS reflectivity with combined phase conjugator and fused silica rod under repetition frequency of 400 Hz

比较表 1 及表 2 发现,在 400 Hz 重复频率下,振荡级电流小时,获得的受激布里渊散射抽运能量反而大。这应该这是由于 400 Hz 时热效应更明显,振荡级腔型改变导致输出能量变大。但是,同时也观察到在相同受激布里渊散射抽运能量下,400 Hz 对应的受激布里渊散射反射率比 100 Hz 更小了,这是由于受激布里渊散射材料内部出现的热积累对受激布里渊散射过程产生的影响^[15]。

实验中,随着输入能量的增大,暴露于光纤前的焦点处出现了空气被击穿的现象。受激布里渊散射反射光双程通过 Nd:YAG 放大级棒放大后,使用 Spricon M-200 M^2 测量仪测量 M^2 值。若采用复合型相位共轭镜,测量得到的 M_x^2 为1.66, M_y^2 为1.66;单使用熔石英棒测量得到的 M_x^2 为2.10, M_y^2 为2.12;若用 0° 全反镜代替相位共轭镜,测量得到的 M_x^2 为

表 2 复合型相位共轭镜及熔石英棒两种情况下实测受激布里渊散射反射率及脉宽
(重复频率 400 Hz, 耦合透镜 $f=410$ mm, 二级放大电流 $I_{a1}=I_{a2}=90$ A)

Table 2 SBS reflectivity and pulse width of combined phase conjugator and fused silica rod
(repetition frequency 400 Hz, coupling lens $f=410$ mm, amplifier current $I_{a1}=I_{a2}=90$ A)

| Oscillator current /A | Pump laser energy /mJ | SBS reflectivity with fused silica rod /% | SBS reflectivity with combined phase conjugator /% | Pump laser pulse width /ns | SBS with combine phase conjugator pulse width /ns |
|-----------------------|-----------------------|---|--|----------------------------|---|
| 55.5 | 30.0 | No reflectivity | 4.9 | 56.69 | 28.84 |
| 56.0 | 36.4 | No reflectivity | 9.57 | 53.32 | 18.58 |
| 56.5 | 43.1 | 1.3 | 10.5 | 62.78 | 30.32 |
| 57.0 | 54.7 | 2.6 | 11.76 | 60.09 | 29.41 |

3.9, M_y^2 为 4.19。由此可见在高重复频率下,使用复合型相位共轭镜能更好地补偿相位畸变,获得较好光束质量的激光输出。

4 结 论

提出使用熔石英棒和光纤组成复合型相位共轭镜。使用芯径 600 μm 的光纤获得斯托克斯种子光。熔石英棒相当于受激布里渊散射放大器,光纤中获得的斯托克斯种子光在其中与入射光相互作用而得到放大。在重复频率分别为 100 Hz 和 400 Hz 条件下,测量了复合型相位共轭镜和仅有石英棒的受激布里渊散射反射率及双通后的 M^2 值。在重复频率 100 Hz 的情况下,用复合型相位共轭镜 x 方向的 M_x^2 为 1.73, y 方向的 M_y^2 为 1.66; 在重复频率 400 Hz 的情况下,用复合型相位共轭镜 x 方向的 M_x^2 为 1.66, y 方向的 M_y^2 为 1.66。实验证明了复合型相位共轭镜具有更低的受激布里渊散射阈值,更高的受激布里渊散射反射率以及更好的双通输出光束质量。但是在重复频率 400 Hz 的情况下由于空气击穿,入射激光功率过高而引起光纤损坏等现象的存在,使其可以应用的入射激光能量限制在 40 mJ 左右。通过解决散热和抽真空等办法是否可以扩大可应用的能量范围,需要进一步的研究。

参 考 文 献

- Chen Jun. Optical Phase Conjugation and Its applications [M]. Beijing: Science Press, 1999. 31~32
陈 军. 光学位相共轭及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 31~32
- R. Y. Chiao, C. H. Townes, B. P. Stoicheff. Stimulated Brillouin scattering and coherent generation of intense hypersonic waves [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1964, **12**(21):592~595
- Yasuhiro Aoki, Kazuhito Tajima. Stimulated Brillouin scattering in a long single-mode fiber excited with a multimode pump laser [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(2):358~363
- J. M. Eggleston, M. J. Kushner. Stimulated Brillouin scattering parastics in large optical windows [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(6):410~412
- K. O. Hill, B. S. Kawasaki, D. C. Johnson. CW Brillouin laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1976, **28**(10):608~609
- E. P. Ippen, R. H. Stolen. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**(11):539~541
- Chong Liu, Jun Chen, Tao Zhou *et al.*. Tapered-fiber phase conjugator with high stability and high reflectivity used for master-oscillator power amplifier systems [J]. *Opt. Eng.*, 2007, **46**(1):014201-1~014201-4
- Chong Liu, Jun Chen, Tao Zhou *et al.*. Analysis of transient stimulated Brillouin scattering in a combined fiber with different core diameter [J]. *Laser Physics*, 2005, **15**(11):1576~1580
- Li Dongming, Zhou Tao, Chen Jun *et al.*. Experimental study on MOPA system of four-pass configuration with optical fiber phase-conjugator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(Suppl.): 131~133
李东明, 周 涛, 陈 军 等. 光纤相位共轭的四通主振荡功率放大器系统实验研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(增刊):131~133
- Hidetsugu Yoshida, Hisanori Fujita, Masahiro 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**:257~267
- Hidetsugu Yoshida, Hisanori Fujita, Masahiro 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
- Hidetsugu Yoshida, Hisanori Fujita, Masahiro Nakasuka *et al.*. High-power phase-conjugating mirror based on stimulated Brillouin scattering in solids [C]. *SPIE*, 2000, **3889**:812~817
- Lü Zhiwei, Hasi Wuliji, He Weiming *et al.*. Experimental study on a two-cell stimulated Brillouin scattering system with tunable pulse duration and high power [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(11):1327~1331
吕志伟, 哈斯乌力吉, 何伟明 等. 高负载脉宽可调双池受激布里渊散射系统的实验研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(11):1327~1331
- Wang Chao, Lü Zhiwei, He Weiming. Picoseconds pulse generation by two-stage stimulated Brillouin scattering compressor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(Suppl.):188~190
王 超, 吕志伟, 何伟明. 利用两级受激布里渊散射获得皮秒激光脉冲[J]. 中国激光, 2004, **31**(增刊):188~190
- Guo Shaofeng, Lu Qisheng, Li Qiang *et al.*. Numerical study on SBS process in fused silica glass under focal pumping [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(9):1106~1110
郭少锋, 陆启生, 李 强 等. 聚焦泵浦条件下固体介质中受激布里渊散射过程的数值研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, **16**(9):1106~1110