

# 大口径锥度光纤 SBS 种子注入的熔石英棒 布里渊放大器特性

崔玲玲<sup>1</sup> 赵智刚<sup>2</sup> 潘孙强<sup>2</sup> 刘崇<sup>2\*</sup> 陈军<sup>2</sup> 谢刚<sup>1</sup> 童立新<sup>1</sup> 高清松<sup>1</sup> 唐淳<sup>1</sup>

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

**摘要** 使用重复频率为 400 Hz 的 Nd:YAG 单纵模主振荡器功率放大(MOPA)激光器作为光源,大口径锥度光纤作为受激布里渊散射(SBS)种子池产生 SBS 种子光,固体熔石英棒作为 SBS 放大池,对反向注入的 SBS 种子光在熔石英棒中呈现不同增益,也即不同抽运功率条件下的布里渊放大行为从功率、时间和空间三个大的方面进行了详细的实验研究,包括放大的 SBS 输出功率、注入 SBS 种子光放大倍率、总的 SBS 反射率、熔石英棒布里渊放大器提取效率以及脉冲宽度和光束质量随 SBS 种子注入功率的变化情况等。获得了最高输出 15.5 W 的放大 SBS 输出、70 倍的 SBS 种子光放大倍率、大于 50% 的总反射率以及 52% 的能量提取效率;观察到脉冲展宽以及布里渊放大器中的增益导引两种现象。实验结果表明,在小信号 SBS 种子光和大信号 SBS 种子光注入情况下,熔石英棒布里渊放大器具有不同的放大特性。另外,在实验过程中还发现,SBS 种子光和抽运光的空间重合程度以及熔石英棒中抽运功率密度的大小是影响 SBS 放大输出功率的两个重要方面。

**关键词** 散射;单纵模;锥度光纤;熔石英棒;布里渊放大器

**中图分类号** TN248.1;O437.2 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0302010

## Characteristics of Fused Silica Rod Brillouin Amplifier Simulated Brillouin Scattering Seeded by Large Aperture Tapered Fiber

Cui Lingling<sup>1</sup> Zhao Zhigang<sup>2</sup> Pan Sunqiang<sup>2</sup> Liu Chong<sup>2</sup> Chen Jun<sup>2</sup>  
Xie Gang<sup>1</sup> Tong Lixin<sup>1</sup> Gao Qingsong<sup>1</sup> Tang Chun<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Applied Electronics, China Academic of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China  
<sup>2</sup> State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

**Abstract** Detailed experimental investigations on the amplification characteristics of back-injected simulated Brillouin scattering (SBS) seed laser in solid fused silica rod Brillouin amplifier under different pump power levels have been done, in which a master oscillator power amplifier (MOPA) single longitudinal mode Nd:YAG laser with repetition rate of 400 Hz is used as pumping source, and a large aperture tapered fiber as SBS generator and solid fused silica rod as SBS amplifier. These characteristics include amplified SBS output power, amplification ratio of injected SBS seed laser, total SBS reflectivity, extraction efficiency of fused silica rod Brillouin amplifier, pulse width and beam quality versus SBS seed laser power. A maximum amplified SBS output power of 15.5 W, amplification ratio of 70, total SBS reflectivity of more than 50%, and extraction efficiency of 52% are obtained. Pulse width broadening and gain guiding have been observed. The experimental results indicate that the fused silica rod Brillouin amplifier has different amplification characteristics with small signal SBS seed laser and large signal SBS seed laser. Additionally, the degree of spatial superposition of SBS seed laser and pump laser and the pump power density in fused silica rod are found to be two important aspects which influence the amplified SBS output power.

**Key words** scattering; single-longitudinal-mode; tapered fiber; fused silica rod; Brillouin amplifier

**OCIS codes** 070.5040; 160.6030; 290.5900; 140.3535

收稿日期:2010-07-19; 收到修改稿日期:2010-10-12

基金项目:浙江省重大科技专项项目(2009C14036)资助课题。

作者简介:崔玲玲(1981—),女,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: zzg4298@126.com

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

# 1 引言

受激布里渊散射(SBS)是一种重要的三阶非线性效应,基于该效应的相位共轭镜在能主振荡器功率放大器(MOPA)激光系统中具有重要的应用,例如:改善激光光束质量、压缩激光脉冲宽度、实现多光束合成等<sup>[1]</sup>。在目前已发展的基于SBS效应的多种结构的相位共轭镜中,独立双池结构具有多项优点:1)将SBS产生池和放大池实现光学隔离,可有效控制进入产生池的能量,使其始终运行于安全范围;2)使用布里渊放大器对SBS种子光进行放大,提升整体的动态范围;3)可通过光学调节机制,灵活调整SBS种子光与抽运光在时间和空间上的重合,保证获得更高的输出功率和效率<sup>[2~6]</sup>。显然,从器件动态范围和效率的角度来讲,在这种独立双池结构中最为关键的就是布里渊放大这一课题。

目前,国内外已有不少关于布里渊放大器研究的报道。国内方面,哈尔滨工业大学的吕志伟教授小组曾对布里渊放大做过较为详细的理论和实验研究工作<sup>[1~6]</sup>,包括受激布里渊放大光脉冲波形的研究<sup>[1]</sup>、种子光与抽运光交角对布里渊放大的影响<sup>[3]</sup>、相遇时间对布里渊放大的影响<sup>[4]</sup>、受激布里渊放大光束发散角实验研究<sup>[5]</sup>、抽运功率密度对布里渊放大的影响<sup>[6]</sup>等,但是在他们的实验装置中所采用的SBS增益介质为四氯化碳液体,且布里渊放大池长度达200 cm,而且没有提及抽运激光器的重复频率。国外方面对布里渊放大器的研究工作主要集中于小信号放大倍率的提升上面<sup>[7~10]</sup>,并且使用的主要SBS增益介质为液体(如CS<sub>2</sub>, CCl<sub>4</sub>)或者气体(如SF<sub>6</sub>),且采用的激光光源重复频率也都较低。而且,对于气体介质必须采用高压来提高密度和相应的SBS增益作用;液体介质,由于其纯度对击穿阈值和相位共轭度有一定的影响,因此使用之前最好进行提纯,并且还会有一定的毒性。因此,寻找高增益、高稳定性的固体SBS介质,探索提高固体布里渊放大器负载能力的方法,建立高效、安全、结构紧凑、操作方便的布里渊放大系统具有重要的现实意义和实际应用前景<sup>[11~14]</sup>。目前,虽然也有相关光纤布里渊放大器的报道,但是受限于光纤结构,能获得的功率和脉冲能量都较低。近些年来,本课题组一直和浙江大学光电子技术研究所的陈军教授保持紧密的合作,致力于提升固体SBS相位共轭镜在高重复频率下的性能,并在100~400 Hz重复频率下得到了较好的结果<sup>[15~17]</sup>。为了继续提升高重复频率条件下SBS相位共轭镜的性能,希望能够使用分离

结构的SBS放大器作为一个整体的相位共轭镜,而在这之前,就很有必要对分离结构的布里渊放大器的一些特性,诸如:功率、时间、空间特性等进行一个详细的探索研究,为之后的整体相位共轭镜的使用提供良好的基础以及有效的参考。

本文使用重复频率为400 Hz的Nd:YAG单纵模MOPA激光器作为光源,大口径锥度光纤作为SBS种子池产生SBS种子光,固体熔石英棒作为SBS放大池,对反向注入的SBS种子光在熔石英棒中呈现不同增益,也即不同抽运功率条件下的布里渊放大行为进行了详细的实验研究,包括放大的SBS输出功率、注入SBS种子光放大倍率、总的SBS反射率、熔石英棒布里渊放大器提取效率以及脉冲宽度和光束质量等随SBS种子注入功率的变化情况等。最终,应用该放大器可以得到超过50%的总反射率,与之前的工作相比有了较大的提升<sup>[16]</sup>,并且在熔石英棒布里渊放大器中观察到了明显的脉冲展宽和增益导引效应。这些都对下一步建立分离结构相位共轭镜具有指导意义和参考价值。

## 2 实验装置

实验装置原理图如图1所示。实验中所使用的光源为一套Nd:YAG单纵模MOPA激光系统,由一个输出功率为0.5 W的单纵模种子激光器经过两级预放大器和两级主放大器进行放大,最终输出功率35 W,脉冲宽度24 ns,重复频率400 Hz,波长1064 nm的单纵模激光。从MOPA激光系统输出的激光束被由 $\lambda/2$ 波片HWP-1和偏振片BP-1组成的光强调节系统分束,用于调节进入SBS种子池端(大口径锥度光纤)和SBS放大池端(熔石英棒)的功率。其中的S偏振光被BP-1反射,并经由

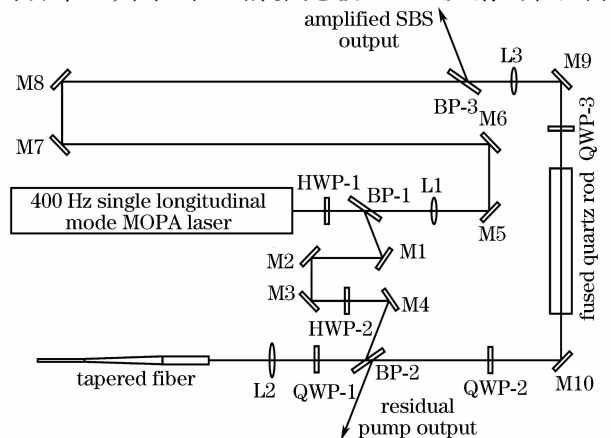


图1 实验装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

35°反射镜 M1, 45°反射镜 M2, 45°反射镜 M3,  $\lambda/2$ 波片 HWP-2, 35°反射镜 M4, 偏振片 BP-2,  $\lambda/4$ 波片 QWP-1 和正透镜 L2 耦合进入特殊设计的大口径锥度光纤,用以产生具有布里渊频移的种子光。 $\lambda/2$ 波片 HWP-2 和偏振片 BP-2 组成的光强调节机构是用来进一步调节进入锥度光纤的功率的,这样便可以达到这样的效果:由 HWP-1 和 BP-1 控制进入放大器一端的功率,而用 HWP-2 和 BP-2 控制进入锥度光纤的功率,进而为研究每一个参数对系统的作用提供了方便。当注入到锥度光纤的功率达到 SBS 阈值后,从锥度光纤返回的 SBS 光再次通过 $\lambda/4$ 波片 QWP-1 而变为 P 偏振光,进而透过偏振片 BP-2,经由 $\lambda/4$ 波片 QWP-2 和 45°反射镜 M10 进入直径为 $\phi = 30$  mm,长度 $L = 250$  mm 的熔石英棒,作为熔石英棒 SBS 放大器的种子光。而从偏振片 BP-1 透过的 P 偏振光经由透镜 L1, 45°反射镜 M5~M8, 偏振片 BP-3, 透镜 L3, 45°反射镜 M9 和 $\lambda/4$ 波片 QWP-3 进入熔石英棒,作为 SBS 放大器的抽运光。 $\lambda/4$ 波片 QWP-2 和 QWP-3 为同轴放置,使得在熔石英棒 SBS 放大器中的种子光与抽运光变为旋向相同的圆偏振光,能够在其中发生非线性相互作用。放大后的 SBS 光束经过 QWP-3 后变为 S 偏振光而从偏振片 BP-3 处耦合出光路进行测量,包括功率、时间以及空间特性;而未被抽取的抽运光经过 QWP-2 后也变为 S 偏振光而从偏振片 BP-2 处耦合出光路而不会进入锥度光纤对其有所影响。

由 BP-1 和 M5~M9 所确定的光路为抽运光提供延迟线,使得从锥度光纤返回的 SBS 种子光能和抽运光在熔石英棒布里渊放大器中在时间上相遇,使得两者能够有效地发生非线性相互作用。为了提升熔石英棒中抽运光的功率密度,使用两个长焦透镜 L1 和 L3 使抽运光会聚在熔石英棒中心,并通过调节反射镜使得 SBS 种子光和抽运光在熔石英棒中实现空间的有效重合。

### 3 实验结果及分析讨论

实验中为了能够进行布里渊放大实验,必须首先获得具有布里渊频移的 SBS 种子光,为了达到全固态效果,使用自行设计的大口径锥度光纤作为 SBS 种子池来产生 SBS 种子光,该光纤作为一种固体相位共轭镜,在高功率抽运条件下可具有大于 50% 的 SBS 反射率<sup>[17]</sup>,且动态范围较大,根据实验情况,在 400 Hz 重复频率条件下注入功率可超过 15 W,但为了安全起见,在实验中将注入光纤的功

率控制在 10 W 以内。其 SBS 反射特性如图 2 所示,在注入功率为 10 W 时,反射率正好达到 50% 而并没有饱和现象,所以注入更多的功率必将返回更高功率的 SBS 种子光。值得一提的是,对于此锥度光纤相位共轭镜,相比较之前实验中测量的反射率有所提升,关于这一点,初步认为是光纤端面处理较好和光纤长度由于切割变短所引起的。

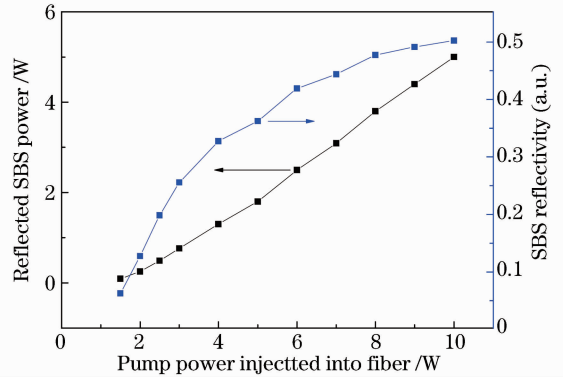


图 2 重复频率为 400 Hz 时,锥度光纤相位共轭镜反射功率随注入功率的变化情况

Fig. 2 Reflected SBS power of the tapered fiber conjugating mirror versus input power with repetition rate of 400 Hz

在熔石英棒布里渊放大器实验中,通过旋转 HWP-1 调节透过 BP-1 的功率,也即注入熔石英棒的抽运功率,需要说明的一点是,实验中测量的抽运功率为 BP-1 后的功率,而在熔石英棒前测量时由于延迟线多次反射和透射的原因,功率有所下降;通过旋转 HWP-2 调节注入到锥度光纤中的功率。图 3 给出了在不同抽运功率下,放大的 SBS 输出功率随注入的 SBS 种子光功率的变化情况。显然,放大的 SBS 输出功率是随着注入的 SBS 种子光功率

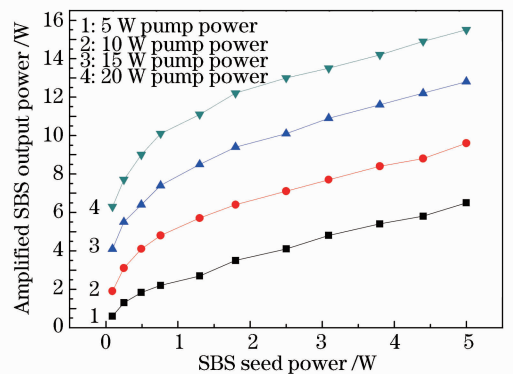


图 3 不同抽运功率下,放大 SBS 输出功率随注入的 SBS 种子光功率的变化情况

Fig. 3 Amplified SBS output power versus injected SBS seed laser power with different pump powers

的增加而增加的,虽然在小信号情况时,高抽运功率对应的情况具有更高的斜率效率,但是在 大信号情况下,对应不同抽运功率时斜率效率却基本相同,而且也没有出现饱和现象。因此,相信 在注入更高的 SBS 种子光功率和抽运光功率条件下,可以获得更高的放大 SBS 功率输出。图 4 给出的是在不同抽运功率下,SBS 种子光放大倍率随注入的 SBS 种子

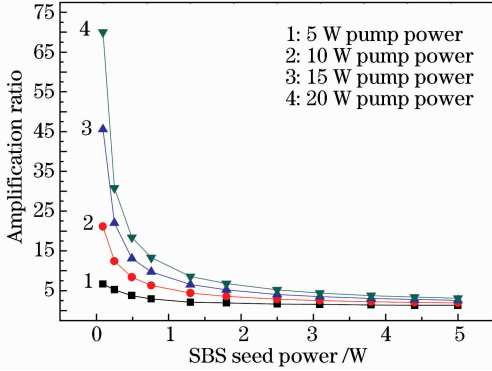


图 4 不同抽运功率下,放大倍率随注入的 SBS 种子光功率的变化情况

Fig. 4 Amplification ratio versus injected SBS seed laser power with different pump powers

光功率的变化情况。从图中可以看出,SBS 种子光放大倍率在小信号和大信号情况下具有截然不同的特性:在小信号区域,随着注入 SBS 种子光功率的减小,其放大倍率呈指数形式剧烈增加,并且在高增益条件下尤为显著,如果进一步减小 SBS 种子光功率,相信可以获得更好的放大倍率;在大信号区域,随着注入 SBS 种子光功率的增加,其放大倍率趋于恒定,但总体来说还是在高增益条件下的放大倍率略高。图 5 给出的是在不同抽运功率下,总 SBS 反射率随注入的 SBS 种子光功率的变化情况。为了定性说明,定义以下参量:注入光纤的功率为  $P_{pf}$ ,光纤返回的 SBS 种子光功率为  $P_s$ ,注入熔石英棒的功率为  $P_{pr}$ ,放大 SBS 输出光功率为  $P_a$ ,那么定义总反射率为  $\eta_t = P_a / (P_{pf} + P_{pr})$ ,放大器提取效率为  $\eta_e = (P_a - P_s) / P_{pr}$ 。从图中可以看出,在小信号区域,总反射率随着注入 SBS 种子光的增加而剧烈提升;而在大信号区域,随着注入 SBS 种子光的增加,总反射率逐渐趋向于饱和,尤其是对于 15 W 和 20 W 这两种抽运功率,总反射率趋于一致。图 6 给出的是在不同抽运功率下,放大器提取效率随注入的 SBS 种子光功率的变化情况。从图中可以看出,其总体趋势与图 5 中的趋势非常相似,在小信号区域变化剧烈,在大信号区域趋于饱和,并且在高增益条件下趋于一致。

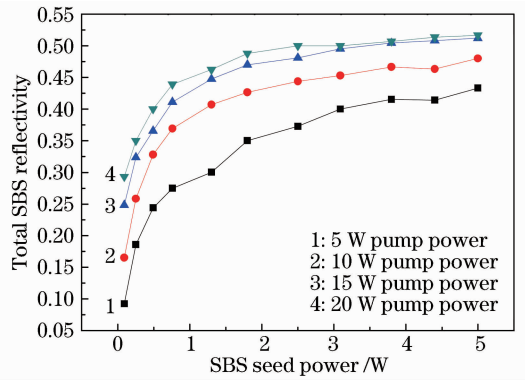


图 5 不同抽运功率下,总 SBS 反射率随注入的 SBS 种子光功率的变化情况

Fig. 5 Total SBS reflectivity versus injected SBS seed laser power with different pump powers

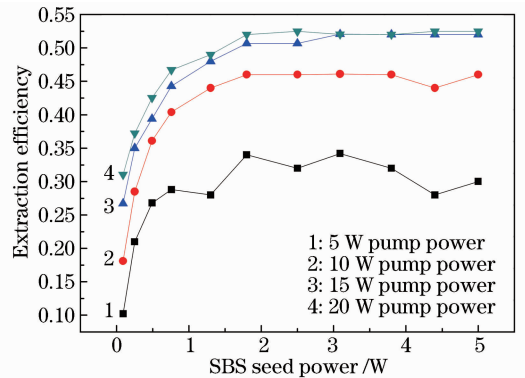


图 6 不同抽运功率下,放大器提取效率随注入的 SBS 种子光功率的变化情况

Fig. 6 Extraction efficiency of amplifier versus injected SBS seed laser power with different pump powers

实验中发现 SBS 种子光和抽运光的空间重合十分重要,在调整光路使两者重合不好的情况下,放大 SBS 输出功率显著降低;当通过调整熔石英棒位置使得抽运光聚焦点逐渐偏离熔石英棒中心时,放大 SBS 输出功率也随之下降;而当平移熔石英棒并通过移动透镜 L3 保证两者空间重合以及抽运光聚焦点落在其中心时,放大 SBS 输出功率并没有太大变化。这表明 SBS 种子光和抽运光空间重合以及布里渊放大器中的抽运功率密度是保证获得高输出功率的两个重要方面;而对于时间重合方面,却由于使用的熔石英棒较短,可相对放宽对其要求而不致使放大 SBS 输出功率显著降低。

图 7 给出的是在不同抽运功率下,熔石英棒布里渊放大器输出的放大 SBS 激光的脉冲宽度随注入 SBS 种子光功率的变化情况。其中图 7(a)~(e)表示的是反向注入种子功率为小信号时的情况,此时  $P_{SBS-seed} = 0.25$  W;图 7(f)~(j)表示的是反向注

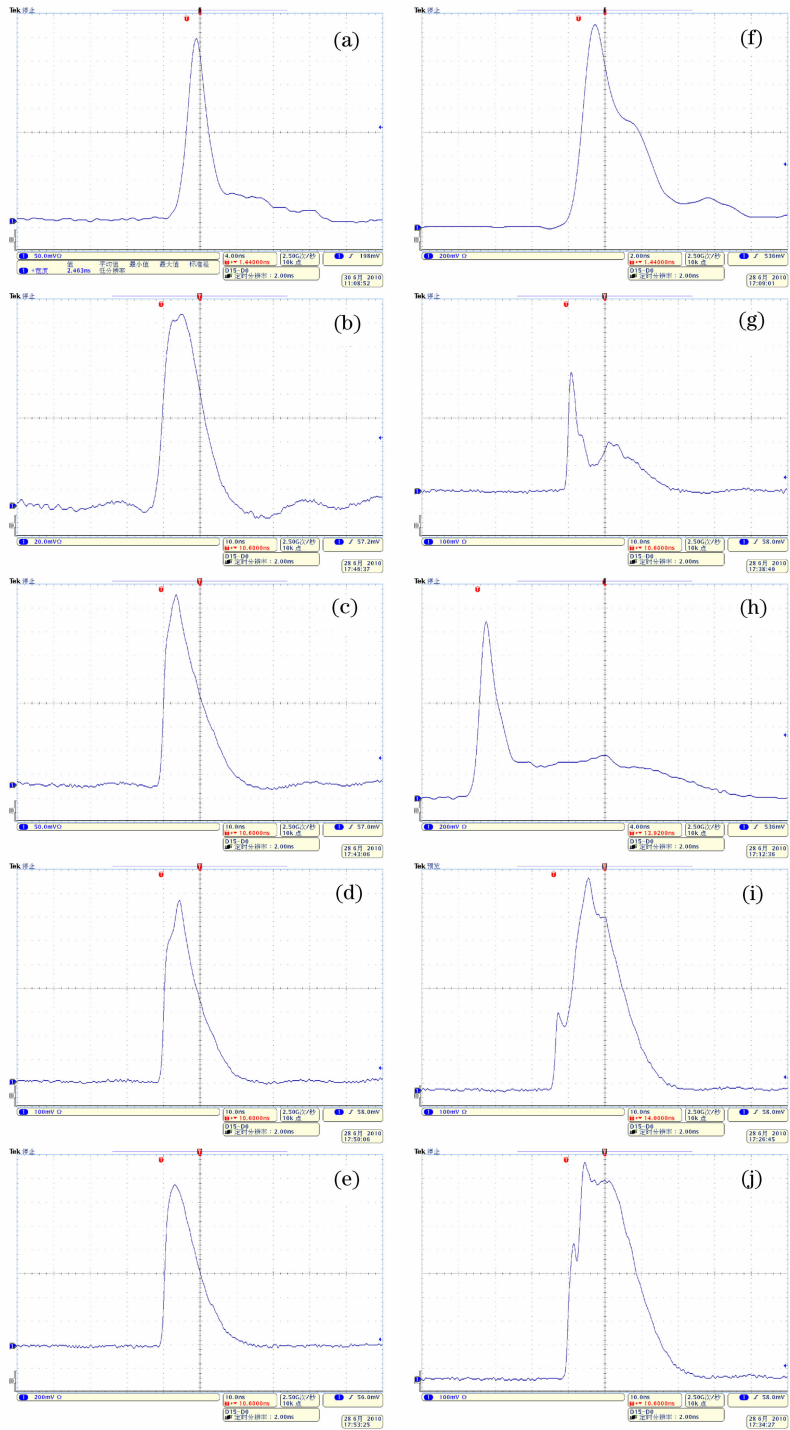


图 7 不同抽运功率下布里渊放大器输出脉冲宽度随注入 SBS 种子光功率的变化情况

Fig. 7 Output pulse width of Brillouin amplifier with different pump powers versus injected SBS seed laser power 入种子功率为大信号时的情况,此时  $P_{\text{SBS-seed}} = 2.5 \text{ W}$ 。图 7(a), (f) 对应于  $P_{\text{pump}} = 0 \text{ W}$ ; 图 7(b), (g) 对应于  $P_{\text{pump}} = 5 \text{ W}$ ; 图 7(c), (h) 对应于  $P_{\text{pump}} = 10 \text{ W}$ ; 图 7(d), (i) 对应于  $P_{\text{pump}} = 15 \text{ W}$ ; 图 7(e), (j) 对应于  $P_{\text{pump}} = 20 \text{ W}$ 。如图所示,实验测得的在不同情况下的脉冲宽度从图 7(a)~(j) 分别为 3, 12, 9, 9, 9, 3, 3, 3, 5, 14 和 18 ns。无论对于小信号还是大

信号情况,都是随着抽运功率的增加,脉冲宽度也增加,并逐步趋向于稳定;但大信号情况下,最终趋向的脉冲宽度要比小信号情况下偏大。这种现象明显与前人的工作有所不同,主要原因如下:在以往采用液体或者气体作为非线性介质的布里渊放大器中,在 SBS 产生池中在使用透镜会聚时,发生 SBS 的位置虽然也会随着抽运功率的增加而逐渐向前移动,



但是却并不很明显,所以种子光和抽运光在放大池中的相遇时间一经设定便不会再有较大的改变,从而总可以通过调节延迟线来获得理想的相遇时间并使脉冲压缩达到最佳化;而如果使用锥度光纤作为SBS产生池,则无论会聚透镜的焦距是多少,光纤中发生SBS的位置都会随着抽运功率的增加而大幅向前移动,当抽运功率增大到一定程度以后向前移动逐渐变得缓慢,这在实验中已经进行了测量,相差十分明显,因此,便会导致在不同的SBS种子光功率注入下,抽运光和种子光的相遇时间其实是在变化的,因此脉冲宽度才会出现先展宽而后逐渐趋向于稳定的实验现象。在实际应用中,初步设想采用

两种办法来避免这种问题:1) 固定某一抽运功率和种子光功率,对其配备适合的延迟线长度;2) 抽运功率和种子光功率可变,延迟线也通过导轨控制,进而达到延迟线最优化。

图8给出的是在小信号情况下( $P_{SBS\ seed} = 0.25\ W$ ),熔石英棒布里渊放大器输出的放大SBS激光的光束质量在不同抽运功率下的变化情况。图8(a)~(g)分别对应如下几种情况:(a)  $P_{pump} = 0\ W$ ; (b)  $P_{pump} = 0\ W$ ,且光束单次通过熔石英棒;(c)  $P_{pump} = 5\ W$ ; (d)  $P_{pump} = 10\ W$ ; (e)  $P_{pump} = 15\ W$ ; (f)  $P_{pump} = 20\ W$ ; (g)  $P_{pump} = 1\ W$ 。从图中可以看出,从光纤返回的SBS光束质量本来是2.25左右[图8(a)],但在单次经过熔石英棒后光束质量急剧下降[图8(b)],这主要是由熔石英棒光学质量不均匀、应力消除不均匀以及多次实验造成的坏点导致的。但在熔石英棒中逐渐出现增益时[图8(c)~(g)],放大SBS激光的光束质量不断提升,最终稳定在1.5~1.6之间,这比SBS种子光束的光束质量

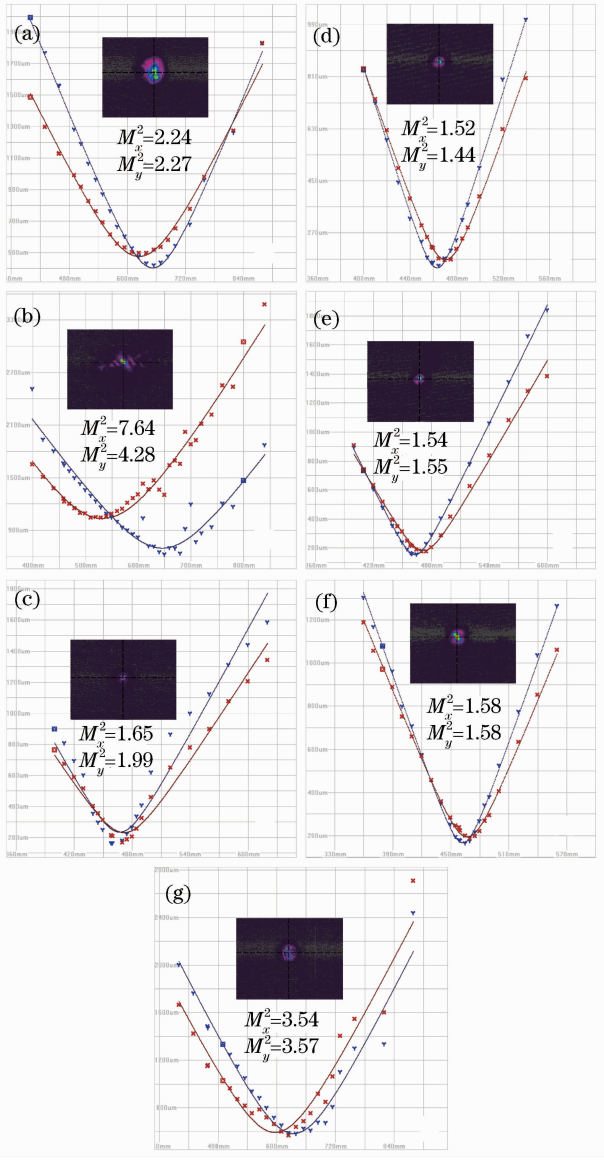


图8 小信号条件下,熔石英棒中注入不同抽运功率时得到的放大SBS光的光束质量变化情况

Fig. 8 Beam quality of amplified SBS laser beam versus different pump powers under small signal condition

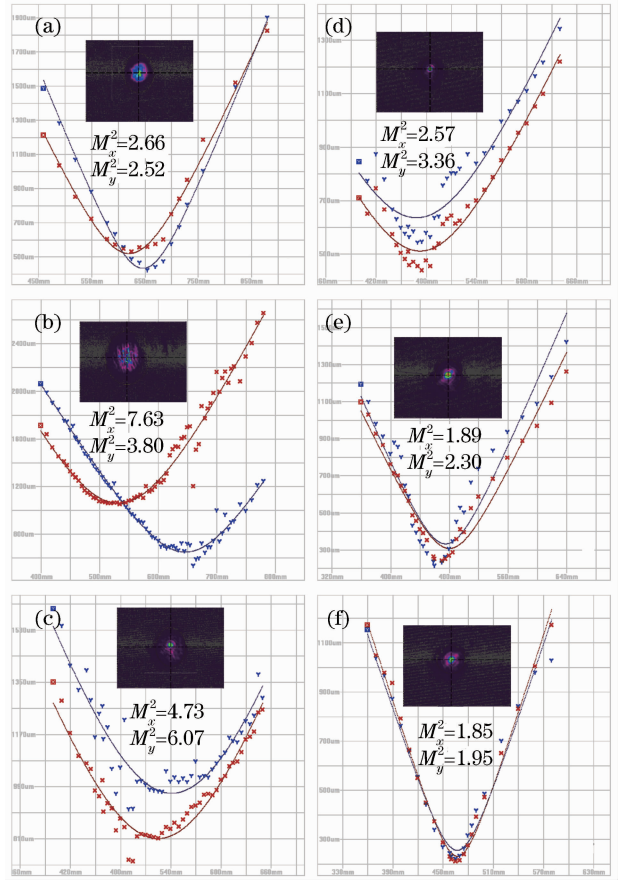


图9 大信号条件下,熔石英棒中注入不同抽运功率时得到的放大SBS光的光束质量变化情况

Fig. 9 Beam quality of amplified SBS laser beam versus different pump powers under large signal condition

还要好。图 8(g)是为了与大信号情况下相比较而重新加入的,因为此时抽运功率  $P_{\text{pump}} = 1 \text{ W}$  正好为 SBS 种子功率的 4 倍,可与图 9 所示的大信号情况下的  $P_{\text{pump}} = 10 \text{ W}$  做比较,因为此时抽运功率也正好为 SBS 种子光功率的 4 倍;另外一方面也更好地体现出了光束质量随着增益的增加而不断提升的过程。这种光束质量随着抽运功率的增加而逐渐改善并趋向于稳定的现象,目前为止在布里渊放大器的研究中还未曾见有报道,本课题组认为这是布里渊放大器中的“增益导引”现象。关于增益导引,在激光放大器和拉曼放大器中均有所报道<sup>[18,19]</sup>。这主要是由于抽运光和 SBS 种子光的空间分布情况和它们之间的非线性耦合共同作用的结果,这也提供了一条有效控制放大 SBS 激光光束质量的途径。

图 9 给出的是在大信号情况下 ( $P_{\text{SBS seed}} = 2.5 \text{ W}$ ),熔石英棒布里渊放大器输出的放大 SBS 激光的光束质量在不同抽运功率下的变化情况。其中图 9(a)~(f)分别对应如下几种情况:(a)  $P_{\text{pump}} = 0 \text{ W}$ ;(b)  $P_{\text{pump}} = 0 \text{ W}$ ,且光束单次通过熔石英棒;(c)  $P_{\text{pump}} = 5 \text{ W}$ ;(d)  $P_{\text{pump}} = 10 \text{ W}$ ;(e)  $P_{\text{pump}} = 15 \text{ W}$ ;(f)  $P_{\text{pump}} = 20 \text{ W}$ 。其变化趋势和成因与小信号情况下类似,在此不再赘述。

## 4 结 论

对固体熔石英棒布里渊放大器在高重复频率下的功率放大特性进行了系统的实验研究,其中反向注入的 SBS 种子激光由大口径锥度光纤提供,通过这种锥度光纤和熔石英棒的组合,实现了全固化的布里渊放大器系统。在融石英棒中呈现不同增益,也即不同抽运功率下对 SBS 种子光的布里渊放大行为进行了研究,获得了放大的 SBS 输出功率、注入 SBS 种子光放大倍率、总的 SBS 反射率以及熔石英棒布里渊放大器提取效率随 SBS 种子注入功率的变化情况。为实现可在高重复频率高能量条件下应用的全固化双池结构的相位共轭镜打下了基础。

## 参 考 文 献

- Ding Yingchun, Lü Zhiwei, He Weiming. Study on pulse waveform of stimulated Brillouin amplification [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, **52**(9):2165~2169  
丁迎春,吕志伟,何伟明. 受激布里渊放大光脉冲波形的研究 [J]. *物理学报*, 2003, **52**(9):2165~2169
- Ding Yingchun, Lü Zhiwei, He Weiming. Current situation for beam amplification of stimulated Brillouin scattering [J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(4):314~317  
丁迎春,吕志伟,何伟明. 布里渊放大研究的进展 [J]. *激光技术*, 2002, **26**(4):314~317
- Ding Yingchun, Lü Zhiwei, He Weiming. Influence of angle

- between seed and pump beam on Brillouin amplification [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6):530~532  
丁迎春,吕志伟,何伟明. 种子光与抽运光交角对布里渊放大的影响 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(6):530~532
- Ding Yingchun, Lü Zhiwei, He Weiming. Influence of encounter time on Brillouin amplification [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7):784~788  
丁迎春,吕志伟,何伟明. 相遇时间对布里渊放大的影响 [J]. *光学学报*, 2002, **22**(7):784~788
  - Ding Yingchun, Lü Zhiwei, He Weiming. Experimental investigation on the divergence of Brillouin amplification beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(9):780~782  
丁迎春,吕志伟,何伟明. 受激布里渊放大光发散角实验研究 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(9):780~782
  - Ding Yingchun, Lü Zhiwei, He Weiming. The influence of pump power density on Brillouin amplification [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(6):1286~1290  
丁迎春,吕志伟,何伟明. 抽运功率密度对布里渊放大的影响 [J]. *物理学报*, 2002, **51**(6):1286~1290
  - Y. Glick, S. Sternklar.  $10^{10}$  amplification and phase conjugation with high efficiency achieved by overcoming noise limitations in Brillouin two-beam coupling [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(6):1074~1082
  - R. Fedosejevs, I. V. Tomov, D. C. D. McKen *et al.*. Experimental study of an SF<sub>6</sub> Brillouin amplifier pumped by KrF laser radiation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **45**(4):340~342
  - Zhiwei Lü, Wei Gao, Weiming He *et al.*. High amplification and low noise achieved by a double-stage non-collinear Brillouin amplifier [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(13):10675~10680
  - F. F. Wu, A. Khizhnyak, V. Markov. A high Brillouin amplification using liquid fluorocarbon [C]. *SPIE*, 2010, **7582**:75821J
  - 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
  - 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
  - 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
  - Hasiwuliji, Lü Zhiwei, He Weiming. Three kinds of stimulated Brillouin scattering media [J]. *Laser Journal*, 2003, **24**(4):8~10  
哈斯乌力吉,吕志伟,何伟明. 受激布里渊散射(SBS)中的三类介质 [J]. *激光杂志*, 2003, **24**(4):8~10
  - 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
  - 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
  - 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镜特性的实验研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(9):2361~2365
  - Jianqiu Xu, Qihong Lou. Gain-guiding effects in transient Raman amplifiers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(6):961~965
  - Xingpeng Yan, Qiang Liu, Xing Fu *et al.*. Gain guiding effect in end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> MOPA lasers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(6):1286~1290