

熔融石英玻璃受激布里渊散射效应实验研究^{*}

郭少锋^{1)†} 林文雄^{1)†} 陆启生²⁾ 陈 燧¹⁾ 林宗志¹⁾ 邓少永²⁾ 朱永祥²⁾

1) 中国科学院福建物质结构研究所, 福州 350002)

2) 国防科学技术大学光电科学与技术学院, 长沙 410073)

(2006 年 1 月 23 日收到, 2006 年 12 月 11 日收到修改稿)

以自行研制的大能量单纵单横电光调 Q 激光系统作为抽运源, 在小尺寸 ($2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 4\text{ cm}$) 的熔融石英玻璃样品中实现了强烈发展的受激布里渊散射 (SBS) 过程, 在工作介质无损的情况下, 相位共轭波能量高达 110 mJ, 反射率约为 60%. 还研究了 SBS 能量反射率与入射角之间的关系, 证实了此前提出的“自供种子光 (self-Stokes-seeding)”效应的存在, 提出了双棒串接的构型, 得到了更为高效的 SBS 过程.

关键词: 受激布里渊散射, 熔融石英玻璃, 激光损伤, 反射率

PACC: 4265C, 4270C

1. 引 言

由于国防工业、材料加工、激光医学和惯性约束核聚变等应用研究的推动, 固体激光和相关单元技术的研究进展非常迅速, 其中发展高光束质量的固体激光系统一直是该领域中研究的热点和难点^[1-4]. 高光束质量是微米精度的快速材料加工以及激光远距离传输的基本要求, 在这些领域, 人们希望能够得到近衍射极限的激光输出. 但是, 在高平均功率固体激光器中, 激光介质的热载将导致热畸变和退偏振, 使光束质量恶化, 消除热畸变以及其他因素造成的光束质量恶化, 成为激光技术领域一项重要的研究课题. 获得高光束质量的方法之一是应用受激布里渊散射 (SBS) 相位共轭技术, 这是因为 SBS 具有相位复共轭的特点, 能够实时有效地补偿工作物质的热透镜效应和光学元件所造成的光束相位畸变, 从而改善光束质量, 获得空间强度平滑分布的近衍射极限的优质光束输出. 除了改善光束质量之外, SBS 效应还在诸如脉冲宽度压缩、相干组束以及脉冲波形控制等方面得到广泛的关注和应用.

目前普遍选用液体 (例如 CCL_4 、 CS_2 、丙酮等) 作为 SBS 相位共轭物质^[5, 6], 这是考虑到液体介质一般具有较低的发生阈值、较高的抗激光损伤阈值和价

格低廉等优点. 但是, 液体介质也存在一些严重不足, 如 (1) 液体的纯度对击穿阈值和相位共轭度有一定的影响, 因此使用之前必须进行提纯; (2) 大部分 SBS 液体介质都有强毒性和强挥发性, 这给操作和封装带来了诸多不便, 而且要经常更换; (3) 液体的波动性给激光放大系统带来较大幅度的涨落, 重复性较差; (4) 在高重复频率辐射作用下, 液体介质的热积累严重, 散热问题不易解决, 这将引起液体介质的击穿和光束质量恶化. 液体 SBS 介质给相位共轭激光器系统带来的直接后果就是难以实用化.

与液体相比, 固体 SBS 介质具有不污染环境、稳定性好、热传导性能优良, 且易于加工处理和结构紧凑等优点, 但是, 固体介质也存在抗损伤阈值低和易于造成永久性损伤 (由于固体无流动性, 因此遭到破坏的位置无法被弥补) 等缺点, 这是造成固体介质 SBS 实验工作进展极其缓慢的最主要原因. 迄今为止, 国内尚未见到相关报道, 在国外也属罕见, 仅有日本的 Yoshida 研究小组进行过比较系统的实验研究^[7, 8], 但尚未达到商品化的阶段.

近年来, 我们开展了光学透明材料中 SBS 诱导破坏机制的研究, 为固体介质中 SBS 的实验研究以及固体 SBS 相位共轭镜 (PCM) 的研制奠定了一定的理论基础^[9-12]. 基于我们自行开发的一维 LONGSID 程序, 对固体中的 SBS 过程进行了数值模拟, 通过分析在激光作用过程中熔融石英玻璃材料内应力场和

^{*} 福建省科技发展基金 (批准号 2004J040) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: wxlin@fjirsm.ac.cn

激光场的发展特征,对 SBS 存在时光学玻璃的破坏机制形成了一些初步的认识。

本文以自行研制的大能量单纵单横电光调 Q 激光系统作为抽运源,在前期理论研究的基础上,开展了熔融石英玻璃样品 SBS 的实验研究,在无损伤的工作状态下,获得了具有一定发展程度的 SBS 相位共轭光,并对某些实验现象进行了分析。

2. 抽运源

材料损伤一方面固然与材料本身特性有关,另一方面,抽运源的时空特性也强烈地影响着材料破坏阈值的高低。早期用于固体 SBS 研究的抽运源绝大部分为多纵模或多横模系统,相干性低, SBS 的发生阈值高,甚至高于材料本身的破坏阈值,因此很难

在无损情况下得到强烈发展起来的 SBS 过程。

我们将自滤波非稳腔设计和种子注入技术有机地集成在同一台系统上,成功地研制出一套适合于 SBS 研究的单纵单横电光调 Q 系统^[13],该系统采用了干涉法的锁定方案,经长期工作检验,单纵模概率为 100%,且可工作于强振动、强气流以及快速温升的环境中,频率漂移小于 10 MHz。图 1 是该系统典型的光斑图样和脉冲形状。激光的时空分布均为光滑的(准)高斯函数,体现了单纵单横的特性。图 1 (b)中,我们用两个不同响应速度(1 和 0.1 ns)的 PIN 探测器测量同一个脉冲,得到结果基本相同,均无拍频或毛刺出现。在保证单纵单横特性的条件下,该系统的本振级输出能量可大于 100 mJ(脉冲宽度为 10—30 ns),经放大后达到 600 mJ。激光束的发散角小于 0.5 mrad。

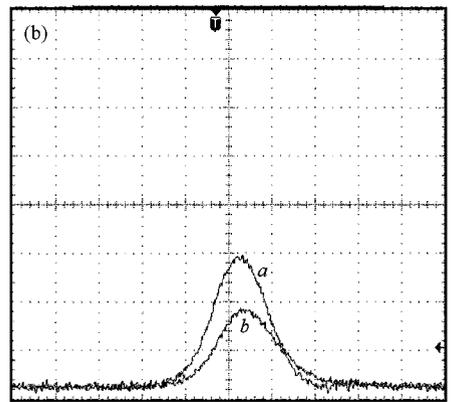
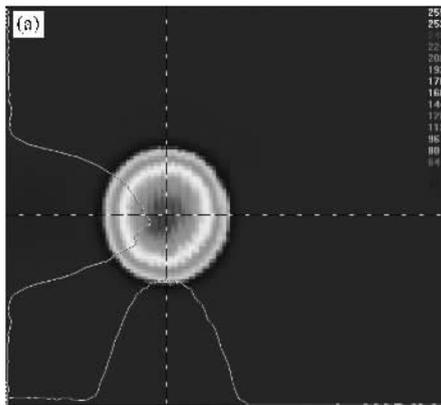


图 1 单纵单横电光调 Q 激光的输出特性 (a)空间分布 (b)时间分布,曲线 a 为响应速度 1 ns 的 PIN 探测器测得的结果,曲线 b 为响应速度 0.1 ns 的 PIN 探测器测得的结果

3. SBS 实验及结果分析

1999 年, Yoshida 等^[8]报道了利用 Corning 7940 玻璃棒作为 SBS 介质,在入射能量 580 mJ 的情况下无损伤获得了 92% 的能量反射率。但是, Yoshida 等所使用的样品长达 300 mm,加工难度大、价格昂贵,也没有达到实用化、工程化的标准。我们立足于普通的国产 JGS-1 型熔融石英玻璃,选取短至 40 mm 的样品,通过合理选取光源、优化耦合系统等措施,力图实现具有实际应用价值的固体 SBS 相位共轭镜。

图 2 所示为 SBS 实验的光路示意图。Nd:YAG 振荡级输出脉冲宽度为 26 ns、能量为 20 mJ 的单频 1064 nm 的电光调 Q 激光(为了尽量减小激光的热

效应并获得尽量长的脉冲宽度,我们将振荡级设定在较低的工作电压),经过放大级后激光能量可达 300 mJ。经过偏振片和 Faraday 旋光晶体组成的光隔离器后,激光被焦距 $f = 1$ m 的透镜聚焦到熔融石英玻璃样品中。我们采用 2 cm \times 2 cm \times 4 cm 的样品进行了单棒实验,并以 2 cm \times 2 cm \times 2 cm 样品作为发生器, 2 cm \times 2 cm \times 4 cm 样品作为放大器进行了双棒实验。SBS 相位共轭光经偏振片反射后进入能量计,测得能量值 E_{SBS} ,扣除样品前后表面的常规反射光能量,除以总能量即得到 SBS 反射率。入射光和反射光的波形由 Thorlabs 公司生产的 DET210 型 PIN 探测器检测,探测器的响应时间小于 1 ns。

图 3 所示为在 SBS 实验中检测到的典型的入射光和 SBS 反射光的脉冲形状。图 3 左边的脉冲为抽

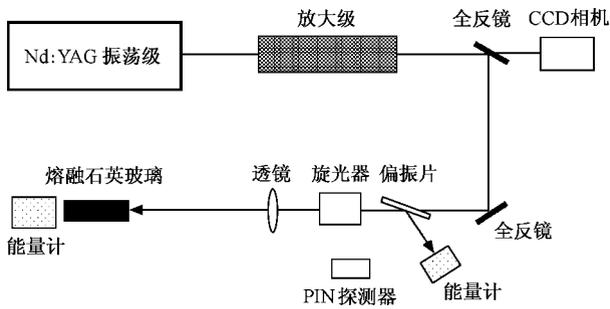


图 2 SBS 实验的光路示意图

运光, 脉冲宽度为 26 ns, 脉冲的上升沿和下降沿时间基本相等; 右边的脉冲为 SBS 回波, 脉冲宽度为 11 ns, 脉冲的上升沿时间明显小于下降沿. 从图 3 中可以观测到明显的脉冲压缩效应, 压缩比为 2.4.

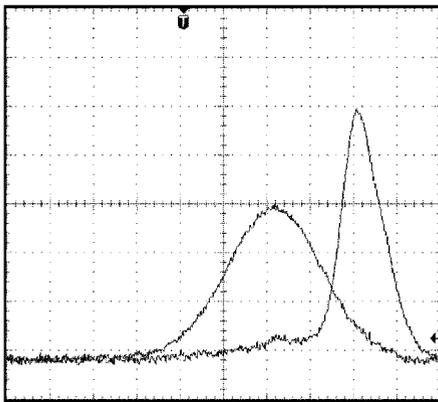


图 3 典型的入射波形和 SBS 反射波形

图 4 所示为在抽运光接近正入射的情况下, SBS 反射率 η 与抽运能量 E_{in} 之间关系曲线. 随着 E_{in} 的增加, η 单调增加并逐渐趋于一个饱和值. 由于激光器输出能量所限以及实验光路的损耗作用, 在脉冲宽度为 26 ns 的条件下, 只能得到大约 200 mJ 的抽运能量, 此时 η 达到 53%, SBS 能量大于 100 mJ.

如果提高振荡级的抽运电压, 可以进一步增加激光的输出能量, 但抽运激光的脉冲宽度将有明显的减小, 这不利于 SBS 的产生. 样品的破坏概率也有较大幅度的增加.

实验中我们观测到一个非常重要的光学现象: SBS 反射率对抽运激光的入射角存在强烈的依赖关系. 当抽运光垂直样品表面入射(入射角为 0°)时, 反射率最大. 随着入射光偏离法线位置, SBS 反射率急剧下降, 如图 5 所示. 当偏离角增加到 5° 时, SBS 能量迅速降至原来的 $1/3$. 当进一步增加偏离角的时候,

由于 SBS 不能充分发展, 导致样品发生了后表面破坏, 无法得到实验数据.

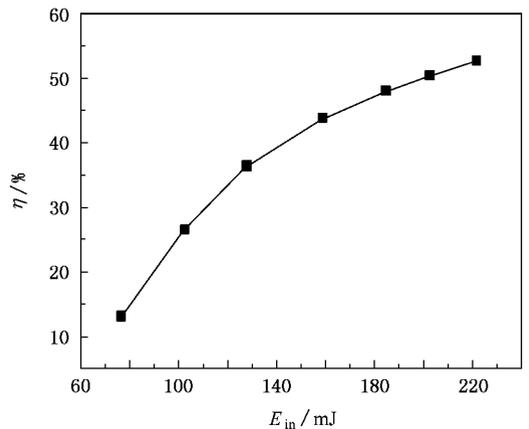


图 4 SBS 反射率与入射能量之间的关系

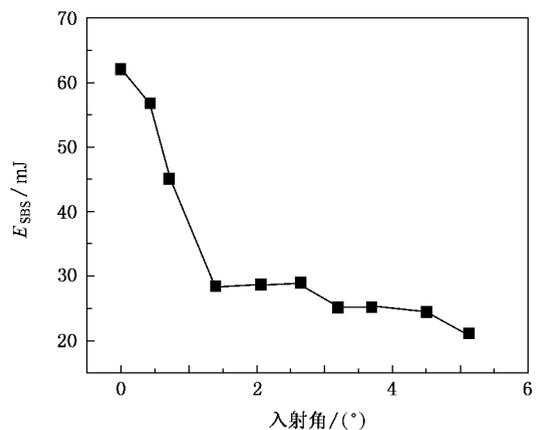


图 5 SBS 能量与入射角之间的关系

我们认为这种现象是“自供种子光(self-Stokes-seeding)效应”^[1]的必然结果. “自供种子光”是我们建立的一种特殊的 SBS 振荡模型, 即当抽运激光正入射到前后表面平行的平板样品上时, 将有部分抽运光被样品后表面反射后沿抽运光的光路反向传播. 按照傅里叶分析, 反射光中可能包含着具有 Stokes 种子光频率的振荡成分, 这些成分和入射光在布里渊介质内发生相互作用, 将会形成一种异于噪声起振和 Stokes 种子光辅助起振的特殊的 SBS 振荡过程, 我们称之为“自供种子光”效应. 很明显, 入射角越小, 抽运激光和后表面反射光之间重叠部分越多, “自供种子光”效应就越明显. 我们的实验在某种程度上验证了这一理论模型的正确性.

为了增加 SBS 效率, 我们立足于小尺寸样品, 进行了双棒串接实验. 样品 A 的尺寸为 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 2$

cm, 置于激光束的焦点处. 样品 B 的尺寸为 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 4\text{ cm}$, 两者之间的间隔为 120 mm. 单独放置样品 A 的情况下有 SBS 发生, 其结果如图 6 曲线 a 所示. 单独放置样品 B 时并无 SBS 发生. 双棒的结果如图 6 曲线 b 所示. 从图 6 可以看出, 双棒对应的 SBS 效率有较大幅度的提升. 但是, 我们并未通过双棒串接的构型得到高于 60% 的反射率, 其主要原因在于当抽运能量增加到一定程度后, 样品 A 的入射面和样品 B 的出射面极易发生破坏, 并伴随有剧烈的响声. 破坏的机理尚在研究中.

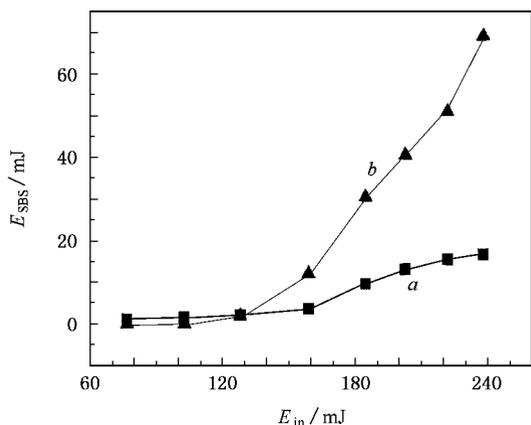


图 6 单棒实验和双棒实验的能量反射率比较. 曲线 a 为单棒实验, 曲线 b 为双棒实验.

4. 结 论

本文于无损情况下在小块熔融石英玻璃样品中

实现了最高达到 60% 的 SBS 反射率. 玻璃介质得以无损伤工作的最主要原因在于抽运源的单纵单横特性降低了 SBS 发生阈值, 而一旦 SBS 得到比较充分的发展, 将部分阻断抽运光的传播, 从而使介质避免破坏. 通过优化耦合光学系统的参数和采用较长的 SBS 介质, 相信可以进一步提高能量反射系数.

虽然本文工作的最终目标是实现产品化的固体 PCM 器件, 但作为初期阶段的工作, 我们更注重物理机理的探讨, 得到了不少富有启发性的结果. 无损运行情况下高于 60% 的能量反射率已可使熔融石英玻璃作为 PCM 装配到激光放大系统中去, 但从实用化的角度上看, 还有许多问题尚未解决. 一是高重频问题. 我们目前实验的最高工作频率是 1 Hz, 作为高平均功率的激光系统, 其工作频率要达到几百赫兹之上, 这使得熔融石英玻璃中也会出现相当的热积累, 长期工作必须考虑散热问题, 而且, 在高重频下材料的破坏机制与单脉冲有所不同, 为保证 PCM 的无损伤工作, 还需要做进一步深入细致的研究. 二是如何让 PCM 器件脱离单纵模的工作条件. 现有的绝大部分电光调 Q 系统还是多纵模输出, 如果要装备熔融石英材质的 PCM, 还须对激光系统进行改造, 首先实现单纵模输出, 至少是有限几个纵模的输出, 这会使固体 PCM 的应用受到很大的限制. 我们的最终目标是在深入研究 SBS 发展规律以及固体材料破坏机制和加固方法的基础上, 把固体 PCM 设计成为一种不依赖于抽运激光纵模特性的相对独立的器件. 这是一项长期而重要的工作, 需要作出更多的努力.

[1] Liu L, Bi G J, Huang M Q *et al* 2003 *Chin. J. Lasers* **30** 885 (in Chinese) [刘 郎、秘国江、黄茂全等 2003 中国激光 **30** 885]

[2] Ding Y C, Lü Z W, Han S W *et al* 2001 *Laser J.* **22** 1 (in Chinese) [丁迎春、吕志伟、韩松巍等 2001 激光杂志 **22** 1]

[3] Lü Z W 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1286 (in Chinese) [吕志伟 2002 物理学报 **51** 1286]

[4] Yu X, Ju Y L, Wang Y Z *et al* 2001 *Chin. J. Lasers* **28** 685 (in Chinese) [于 欣、鞠有伦、王月珠等 2001 中国激光 **28** 685]

[5] Hasiwuliji, Lü Z W, He W M 2003 *Laser Technol.* **27** 304 (in Chinese) [哈斯乌里吉、吕志伟、何伟明 2003 激光技术 **27** 304]

[6] Ha Y Q, Yang J G 2000 *Laser Technol.* **24** 151 (in Chinese) [哈元清、杨经国 2000 激光技术 **24** 151]

[7] Yoshida H, Fujita H, Nakatsuka M *et al* 1997 *Opt. Eng.* **36** 2557

[8] Yoshida H, Fujita H, Nakatsuka M *et al* 1999 *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** L521

[9] Guo S F, Lu Q S, Cheng X A *et al* 2003 *High Power Laser and Particle Beams* **15** 850 (in Chinese) [郭少锋、陆启生、程湘爱等 2003 强激光与粒子束 **15** 850]

[10] Guo S F, Lu Q S, Li Q *et al* 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **16** 1106 (in Chinese) [郭少锋、陆启生、李 强等 2004 强激光与粒子束 **16** 1106]

[11] Guo S F, Lu Q S, Cheng X A *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 99 (in Chinese) [郭少锋、陆启生、程湘爱等 2004 物理学报 **53** 99]

[12] Guo S F, Lu Q S, Cheng X A *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1831 (in Chinese) [郭少锋、陆启生、程湘爱等 2004 物理学报 **53** 1831]

[13] Guo S F, Lin W X, Li Q *et al* 2006 *Chin. J. Lasers* **33** 1 (in Chinese) [郭少锋、林文雄、黎 全等 2006 中国激光 **33** 1]

Experimental research on stimulated Brillouin scattering in fused silica glass^{*}

Guo Shao-Feng^{1,2)} Lin Wen-Xiong^{1)†} Lu Qi-Sheng²⁾ Chen Sui¹⁾ Lin Zong-Zhi¹⁾
Deng Shao-Yong²⁾ Zhu Yong-Xiang²⁾

¹⁾ Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350002, China)

²⁾ College of Opto-electric Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 23 January 2006 ; revised manuscript received 11 December 2006)

Abstract

Stimulated Brillouin scattering (SBS) is one of important nonlinear optical phenomena, which is widely used in the areas of phase conjugation, pulse compression and beam combination. In this paper, a single axial and single transverse mode Q switched laser system is used as pump source and SBS is investigated experimentally in small bulk fused silica. Damage free operation is observed with SBS reflectivity up to 60%. The self-Stokes-seeding effect, which has been reported elsewhere, is verified. To improve reflected energy and SBS efficiency, two SBS samples connected in series is configured, but the SBS reflectivity cannot exceed 60% due to surface damage.

Keywords : stimulated Brillouin scattering, fused-silica glass, laser-induced-damage, reflectivity

PACC : 4265C, 4270C

^{*} Project supported by the Science and Technology Development Foundation of Fujian Province, China (Grant No. 2004J040).

[†] Corresponding author. E-mail : wxlin@fjirsm.ac.cn