

# 熔石英相位共轭镜无损工作状态分析\*

郭少锋<sup>1,2</sup>, 林文雄<sup>1</sup>, 陆启生<sup>2</sup>, 林宗志<sup>1</sup>, 邓少永<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 福建物质结构研究所, 福建 福州 350002;  
2. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 基于非线性光学耦合波方程组建立了聚焦泵浦条件下熔石英玻璃材料中 SBS 过程的物理模型并编制了相应的数值求解程序, 研究了 SBS 介质内激光场的时空发展特征, 从而试图揭示 SBS 介质的内在破坏机制并寻求相应的加固措施。通过数值模拟程序研究了焦点处激光功率密度以及 SBS 反射率与激光能量的依赖关系, 发现 SBS 对介质内的激光场具有“限幅”作用, 即在注入能量大幅度提升的情况下, 内部的激光场强度只有较小的增加, 这种机制使大能量的固体介质 PCM 成为可能。分析激光脉宽以及耦合透镜焦距等参数对 SBS 过程的影响发现, 精细选择系统参数, 在熔石英玻璃材料中有可能无损地实现高效的 SBS 过程。

**关键词:** 受激布里渊散射; 聚焦泵浦; 熔石英玻璃; 激光损伤

**中图分类号:** TN241; O437 **文献标识码:** A

发展大能量高光束质量的固体激光系统一直是激光技术领域中研究的热点和难点。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<sup>[1~3]</sup>, 目前, 在装备有 SBS 相位共轭镜(PCM)的主振荡功率放大(MOPA)系统中可实现近衍射极限几百 W 的平均功率输出。MOPA 等相位共轭激光器系统普遍选用液体介质, 例如, CCL<sub>4</sub>, CS<sub>2</sub>, 丙酮等, 作为相位共轭物质, 这是因为液体介质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 SBS 介质的强毒性, 强挥发性和波动性等缺点使相位共轭激光器系统难以实用化和商品化。与液体相比, 固体 SBS 介质, 例如熔石英玻璃, LAP, DLAP 晶体等, 具有不污染环境、稳定性好、热传导性能优良, 易于加工处理等优点, 以固体介质作为相位共轭镜可以实现结构更加紧凑的, 性能更加稳定的全固化的激光系统的, 但是, 由于发现固体介质的抗激光损伤阈值非常低, 该项研究开发工作一度处于停滞不前的状态。近年来, 日本学者 Yoshida 等人在固体介质 SBS 方面开展了卓有成效的工作<sup>[4~6]</sup>, 目前报道已在熔石英玻璃(Heralux-E 型, 日本 Shin-Etsu 石英株式会社)中实现 2.3 J 注入能量、反射率大于 95% 的 SBS 过程, 装备熔石英相位共轭镜的振荡-放大激光系统实现了 7 J, 1.3 倍衍射极限的输出。Yoshida 的实验结果似乎与人们最初认识到的熔石英玻璃具有极低的破坏阈值这一事实有不符之处, 这也说明 SBS 中还有着需要我们进一步探讨的规律和现象。

我们拟通过本文及后续研究工作, 在理论和实验两方面对熔石英玻璃材料中 SBS 效应进行深入细致的研究, 力图无损地实现高效的固体 SBS PCM 系统。作为理论方面的初步工作, 本文应用一维 SBS 模型研究了玻璃介质内激光场的时空发展特征, 探讨了在 SBS 发生的情况下玻璃介质中的破坏机制, 研究几个工作参数对 SBS 的影响, 并对相位共轭镜的设计提出了一些建议。

## 1 物理模型及数值模拟方法

研究 SBS 现象的物理基础是非线性光学的耦合波方程组<sup>[7]</sup>。考虑到 SBS 一般是通过在介质前放置聚焦透镜实现的, 我们对传统的 SBS 方程组进行了改造, 加入聚焦项以描述透镜聚焦效应带来的激光强度在光轴方向( $x$  方向)上的变化<sup>[8]</sup>。聚焦型 SBS 方程组为

$$\frac{\partial A_p(x,t)}{\partial x} + \frac{A_p(x,t)}{\omega(x)} \frac{\partial \omega(x)}{\partial x} + \frac{n}{c} \frac{\partial A_p(x,t)}{\partial t} = \frac{i\gamma_k p}{2\rho_0 n^2} A_a(x,t) A_s(x,t) \quad (1)$$

$$-\frac{\partial A_s(x,t)}{\partial x} - \frac{A_s(x,t)}{\omega(x)} \frac{\partial \omega(x)}{\partial x} + \frac{n}{c} \frac{\partial A_s(x,t)}{\partial t} = \frac{i\gamma_k s}{2\rho_0 n^2} A_a^*(x,t) A_p(x,t) \quad (2)$$

$$\frac{\partial A_a(x,t)}{\partial t} + v_a \frac{\partial A_a(x,t)}{\partial x} + \frac{\alpha_a v_a}{2} A_a(x,t) = \frac{i\epsilon_0 \gamma k_a}{4v_a} A_s^*(x,t) A_p(x,t) + f(x,t) \quad (3)$$

\* 收稿日期: 2004-11-22; 修订日期: 2005-01-20

基金项目: 福建省青年科技人才创新基金资助课题(2004J040)

作者简介: 郭少锋(1975—), 男, 在站博士后, 主要从事激光破坏机理和激光器件的研究工作; E-mail: sfguo@fjirsm.ac.cn.

在式(1)~(3)中: $A_p, A_s$  和  $A_a$  分别是泵浦光、Stokes 光和声波场的复振幅; $\rho$  为介质密度的变化量; $v_a$  为声波的传播速度; $\alpha_a$  为声波在介质内的衰减系数; $\gamma$  为介质的电致伸缩系数或弹性光学系数, $\epsilon_0$  为真空介电常数, $n$  为介质的折射率; $c$  为真空中的光速, $\rho_0$  为不存在外界光场的情况下介质的平均密度。 $f(x, t)$  是 Langevin 噪声源项,用来表征介质密度的热起伏,其具体表达式可参考文献[10]; $\omega(x)$  为光束截面半径。

我们采用有限差分方法编制了研究后向 SBS 诱导破坏问题的程序 LONGSID,利用该程序,可以对聚焦泵浦条件下熔石英玻璃棒中的 SBS 过程进行较为细致的研究。

本文的工作基于以上 1 维 SBS 方程组及 LONGSID 程序。

## 2 SBS 的限幅机理

SBS 介质有两种可能的破坏机制:相干力学破坏<sup>[9,10]</sup>和电离击穿<sup>[11]</sup>。相干力学破坏是指在 SBS 过程中产生及放大的相干声波场导致材料发生的力学断裂,破坏应该发生在材料的前表面(激光的入射面)。电离击穿破坏是指当电场强度达到一定程度时,介质内部发生碰撞电离和多光子吸收电离,产生高密度的等离子体,同时引起材料的损伤,电离破坏发生在光强最大值位置,通常位于焦点附近。考虑到目前 SBS 实验中观察到的破坏现象通常发生在焦点位置,本文暂不考虑相干破坏,而把研究重点放在考察焦点处光强的演化情形,并同时“监测”SBS 反射率。

SBS 实验的光路如图 1 所示。激光通过焦距为  $f$  的透镜入射到熔石英玻璃棒中,焦点位于  $x_0$  处。在我们的计算中,激光波长  $\lambda$  取  $1.06 \mu\text{m}$ 、束腰半径  $\omega_0$  取  $5 \text{ mm}$ ,熔石英玻璃棒长度取为  $10 \text{ cm}$ ,焦点  $x_0$  距棒前表面(激光入射面)大概为  $7.5 \text{ cm}$ 。材料参数取自文献[12]。

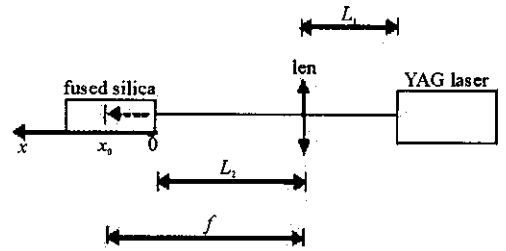


Fig. 1 Optical schematic of SBS experiment  
图 1 SBS 实验光路简图

在对 SBS 进行理论和实验研究的绝大部分文献中,由于不涉及介质破坏,研究的物理量主要是能量反射率、保真度以及压缩比等。而本文重点考察的是焦点处的光强  $I_{pf}$  的演变情形。图 2 实线所示为在入射能量  $E_p$  为  $1 \text{ J}$ ,脉宽  $\tau$  为  $15 \text{ ns}$ ,焦距为  $200 \text{ mm}$  的情况下计算得到的  $I_{pf}$  的演变情形。虚线所示为同等条件下,单纯由于聚焦效应而产生的  $I_{pf}$  的演变情况。比较两条曲线可以看出,如果不考虑 SBS 效应,焦点处的光强由于紧紧聚焦,强度可以达到  $10^{17} \text{ W/m}^2$ ,但是由于 SBS 的产生和发展,后续激光场在传播到焦点之前就被转化为后向散射光,对焦点处的介质产生了屏蔽作用,导致作用到焦点区域的激光强度只有  $10^{16} \text{ W/m}^2$ ,也就是说,只有大约  $1/10$  的激光功率通过了转化区域而传输到焦点及以后的区域,我们把这种现象称之为 SBS 的“限幅”机理。在能量注入的初始阶段, $I_{pf}$  完全取决于聚焦效应,所以上升沿和入射激光脉冲一致,当 SBS 效应迅速增长起来后, $I_{pf}$  也迅速降至一个很低的水平,而且在整个入射激光作用期间,都不会再有较大幅度的回升。如果能够降低 SBS 发生的阈值,提前 SBS 到来的时刻,可以预期, $I_{pf}$  的峰值理应有降低的可能,这将使 SBS 介质更加安全。

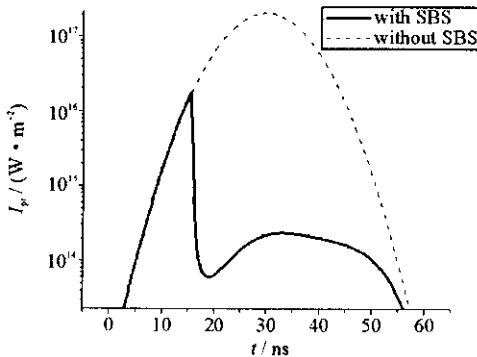


Fig. 2 Temporal profile of laser intensity at focus spot  
图 2 焦点光强的时间演化波形

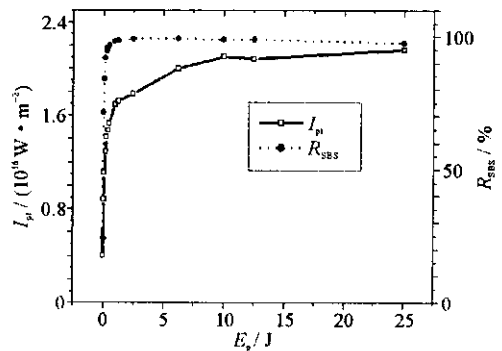


Fig. 3 Dependence of incident energy on intensity at focus spot and reflectivity

图 3 焦点光强和反射率与入射能量的函数关系曲线

为了更全面理解这种“限幅”机理,我们研究了焦点峰值光强与 SBS 泵浦能量  $E_p$  之间的依赖关系,如图 3 所示。图中虚线所示为对应的 SBS 反射率。当  $E_p$  较小时,反射率和峰值光强随着  $E_p$  的增加都有迅速的增

长,当  $E_p$  超过一定程度后(图 3 中所示大约为 2 J),反射率逐渐逼近 100%,焦点处的光强也逐渐趋于一稳定值,不再随着  $E_p$  的增加而增加。在某种意义上,这种结果说明,如果 SBS 介质的抗激光损伤阈值能够高于该稳定值,介质的焦点将不会由于  $E_p$  的增加而破坏。

### 3 脉宽效应和焦距效应

一般而言,熔石英玻璃材料的光致电离击穿的阈值在  $10^{15}$  W/m<sup>2</sup> 或者 1 kJ/cm<sup>2</sup> 量级。在上一节的计算条件下,焦点处的光强在  $10^{16}$  W/m<sup>2</sup> 量级,材料可能无法承受。在不降低泵浦能量的情况下,显然可以通过改变激光脉宽以及透镜焦距等参数来改变焦点光强。本节研究这两个参数对 SBS 过程的影响。

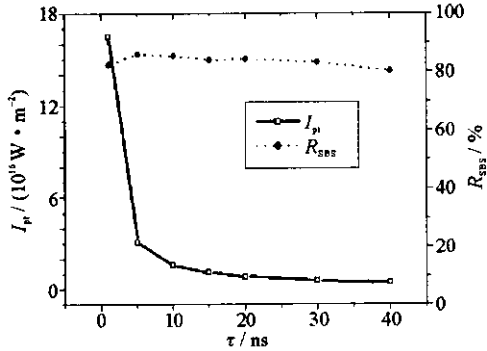


Fig. 4 Effect of pulse width on SBS

图 4 SBS 的脉宽效应

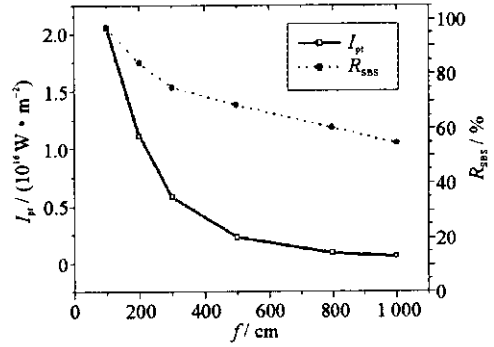


Fig. 5 Effect of focus length on SBS

图 5 SBS 的焦距效应

图 4 的计算条件是  $E_p = 100$  mJ,  $f = 200$  mm, 所给出的曲线表征  $I_{pf}$  与脉宽  $\tau$  的依赖关系。在我们的计算范围内,  $I_{pf}$  与脉宽  $\tau$  呈双曲线关系, 当脉宽从 1 ns 增加至 40 ns 时,  $I_{pf}$  从  $16 \times 10^{16}$  W/m<sup>2</sup> 降低到  $5 \times 10^{15}$  W/m<sup>2</sup>, 而反射率保持在 80% 左右基本不变。这说明通过增加脉宽来降低焦点处的激光强度, 从而提升入射激光的能量是行之有效的。激光脉宽对 SBS 的影响主要体现在 SBS 也需要一个建立时间, 其大小取决于介质的声子寿命、泵浦激光的强度以及 SBS 的构型等因素, 在 SBS 发生器的情形下, 受激散射过程是由噪声场激发的, 脉冲建立时间一般和声子寿命相当(熔石英玻璃材料的声子寿命大概为 4 ns)。如果脉宽远小于脉冲建立时间的话, 入射激光的峰值功率可以无阻碍的传播到焦点处, 形成很大的功率密度。如果脉宽大于脉冲建立时间, SBS 可以在峰值时刻到来之前迅速增长起来, 阻止能量进一步到达焦点。在图 4 对应的计算条件下, 脉冲建立时间大约为 5 ns,  $I_{pf}$  在脉宽大于 5 ns 后急剧下降。

图 5 的计算条件是  $E_p = 100$  mJ,  $\tau = 15$  ns, 所给出的曲线表征  $I_{pf}$  与透镜焦距  $f$  的依赖关系。随着焦距的增加, 焦点光强和反射率都在单调下降, 当焦距达到 1 m 时,  $I_{pf} = 5 \times 10^{14}$  W/m<sup>2</sup>, 小于光致电离击穿阈值, 但同时反射率也下降到不足 60%。焦距对 SBS 过程的影响主要体现在, 如果不考虑 SBS 时, 焦点处的光强近似反比于焦距的平方, 由于焦距的增加带来了焦点光强显著的降低, 但同时也增加了 SBS 的建立时间, 部分削弱了焦点的屏蔽作用, 降低了 SBS 的效率。SBS 存在时  $I_{pf}$  的大小是纯聚焦和 SBS 限幅效应综合作用的结果, 从计算结果看, 当  $E_p = 100$  mJ 时, 前者占了主导作用。但是可以预期, 随着入射能量的进一步增加, 限幅的作用将越来越大, 总会存在一个比较理想的参数范围, 既能激发出充分的 SBS, 又可使  $I_{pf}$  位于击穿阈值以下。

从以上分析可知, 如果要保证熔石英相位共轭镜安全高效的运行, 必须针对入射能量选择合适的系统参数, 其中激光脉宽和耦合透镜焦距是需要重点考虑的。具体参数的选择最终还须实验确定, 本文的数值研究只能提供一些定性的规律以供参考。

### 4 讨论

在本文的数值研究中, 各计算参数都是按照 Yoshida 的实验参数来选取的。数值模拟的结果与实验定性一致。但是, 在我们的某些计算结果中, 焦点光强大大超过了击穿阈值, 而对应的实验却取得了无损伤运行, 这可能是我们的模型过于理想化, 没有考虑像差等原因造成的光斑的发散, 从而过小估计了焦点处的光斑尺寸。

综合文中的计算结果, 我们认为使相位共轭镜高效无损运行的关键点其实是在泵浦激光作用期间尽快激发出 SBS, 除了选取声子寿命短的介质外, 在 SBS 起振时刻注入一定的种子光使其成为放大器构形应该也

是一个不错的思路。即使焦点足够安全了,也并不意味着熔石英相位共轭镜就不会遭受激光损伤了。因为还存在另外一种破坏机制——相干声波破坏,据我们的计算结果,在入射能量达到 10 J 后,相干破坏将很有可能发生,此时破坏的危险区域在激光的入射面。Yoshida 在实验中曾观察到前表面破坏,但未能给出解释。

### 参考文献:

- [1] 刘郎, 秘国江, 黄茂全, 等. 高重复频率大能量单纵模激光器[J]. 中国激光, 2003, **30**(10):885—889. (Liu L, Bi G J, Huang M Q, et al. High repeating rate and big energy single-longitudinal mode laser. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **28**(8):685—688)
- [2] 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. (Ding Y C, Lü Z W, Han S W, et al. Development for the phase-conjugated MOPA-systems based on stimulated Brillouin scattering. *Laser Journal*, 2001, **22**(2): 1—5)
- [3] 于欣, 鞠有伦, 王月珠, 等. 利用受激布里渊散射提高固体激光系统光束质量的实验研究[J]. 中国激光, 2001, **28**(8):685—688. (Yu X, Ju Y L, Wang Y Z, et al. Experimental investigation for improving the solid state laser beam quality with SBS. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **28**(8):685—688)
- [4] Yoshida H, Fujita H, Nakatsuka M, 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.
- [5] Yoshida H, Fujita H, Nakatsuka M, et al. High resistant phase conjugated stimulated Brillouin scattering mirror using fused silica glasses for Nd:YAG laser system[J]. *Jpn J Appl Phys*, 1999, **38**(5A):L521—L523.
- [6] Yoshida H, Fujita H, Nakatsuka M, et al. Fused-quartz glass with low quality as a high damage-resistant stimulated Brillouin-scattering phase-conjugation mirror[J]. *Optics Communication*, 2003, **222**:257—267.
- [7] Boyd R W. *Nonlinear Optics*[M]. London: Academic Press Limited, 1992.
- [8] 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. (Guo S F, Lu Q S, LI Q, et al. Numerical study on SBS process in fused silica glass under focal pumping. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(9):1106—1110)
- [9] Yu H W, Meng S X. Transient stimulated Brillouin scattering and damage of optical glass[J]. *J Appl Phys*, 1997, **81**(1):85—88.
- [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)
- [11] Balkevicius P, Kosenko E, Lukosius J, et al. SBS influence on laser damage of optical materials[A]. Proc of Damage in Laser Materials [C]. 1979, **568**:519—527.
- [12] Heiman D, Hamilton D S, Hellwarth R W. Brillouin scattering measurement on optical glasses[J]. *Phy Rev B*, 1979, **19**(12):6583—6592.

## Numerical research on phase-conjugated stimulated Brillouin scattering mirror using fused-silica glass without laser-induced damage

GUO Shao-feng<sup>1,2</sup>, LIN Wen-xiong<sup>1</sup>, LU Qi-sheng<sup>2</sup>, LING Zhong-zhi<sup>1</sup>, DENG Shao-yong<sup>2</sup>

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

2. College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Based on the nonlinear optics coupled wave equations, a physics model of SBS under focal pumping condition was established and numerical codes were developed. The laser field in fused silica glass when SBS existed was thoroughly evaluated and the damage mechanism was exploited. It is found that the optical-limiting-effect makes the laser intensity decrease in the focus spot to a moderate level. The dependence of SBS process on the laser pulse width and focal length of coupling lens was discussed and an operation state with high efficiency and without laser-induced damage was suggested.

**Key words:** Stimulated Brillouin scattering; Focal pumping; Fused-silica glass; Laser-induced-damage