

文章编号: 0253-2239(2009)03-0756-05

高功率激光对大口径融石英玻璃的破坏的研究

唐顺兴 欧阳小平 朱宝强 林尊琪

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘要 针对神光 II 第九路激光装置三倍频达标实验中出现的口径大融石英玻璃的破坏现象, 分析产生的原因和机制, 确定了是由横向受激布里渊散射(TSBS)造成的, 并采用了有效抑制 TSBS 的方案。理论上建立了大口径融石英玻璃中横向受激布里渊散射的增益模型, 利用该模型计算了高功率激光系统中融石英取样镜的破坏阈值。实验结果和理论计算均得到 310 mm 口径窄带激光能量达到 2~3 kJ 时融石英玻璃将产生破坏。

关键词 受激布里渊散射; 破坏阈值; 增益模型; 融石英

中图分类号 O437.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092903.0756

Research on High-Power Laser Induced Damage of Large Aperture Fused Silica

Tang Shunxing Ouyang Xiaoping Zhu Baoqiang Lin Zunqi

(*Joint Laboratory for High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,*
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract Damage of a sampling fused silica reflector has been observed when the performance of the 9th beam of Shenguang-II was tested. By analyzing the inducement and mechanism, it is confirmed that the transverse stimulated Brillouin scattering (TSBS) induces the damage. Increasing the bandwidth by 30 GHz can prevent further damage efficiently. A propagation model of TSBS in large aperture fused silica has been established, which can calculate the intensity threshold of laser induced damage in fused silica. Theoretical calculation and experimental results show that the fused silica glass will be damaged if the energy of large aperture (310 mm diameter) narrow bandwidth laser reaches 2~3 kJ.

Key words stimulated Brillouin scattering; damage threshold; gain model; fused silica

1 引言

随着科技的进步, ICF 驱动装置正朝着大口径、高功率密度的趋势发展。当激光的口径增大时, 光学元件中一些由横向非线性效应, 如横向受激布里渊散射(TSBS)、横向受激拉曼散射(TSRS)等对激光束质量的影响变得十分显著, 甚至对大口径光学元件产生破坏。所以研究高功率激光对大口径融石英玻璃的破坏机理, 寻找避免破坏的有效手段具有十分重要的意义, 这也成为 ICF 驱动装置研究中被

研究人员密切关注的问题。

劳伦斯·利费莫尔国家实验室(LLNL)早在 20 世纪 70 年代就展开了相关课题的研究, 并且在 1988 年发表了他们的研究成果^[1]。后来 Nova 系统还是出现了波长为 0.351 μm 的三次谐波造成的反射镜、取样镜和靶镜的破坏。由于早期的理论模型不能够给出合理的解释, 于是又在 1990 年发表文章提出了一个经验公式^[2]。他们认为融石英玻璃的破坏是由其体内产生的 TSBS 效应引起的, 受激声子在融石英玻璃

收稿日期: 2008-06-30; 收到修改稿日期: 2008-08-09

作者简介: 唐顺兴(1983-), 男, 博士研究生, 主要从事高功率激光系统中非线性光学和光束质量诊断。

E-mail: apolababy@hotmail.com

导师简介: 林尊琪(1942-), 男, 院士, 研究员, 主要从事高功率激光技术和激光等离子体等方面的研究。

E-mail: zqlin@mail.shenc.ac.cn

边缘反射并不断叠加放大造成了玻璃的破坏。

我国科研人员也有对相关现象进行了研究^[3~7]。近年国防科大郭少峰等^[4]建立了 TSBS 的数值耦合模型,并编写算法进行了计算机模拟,结果比 LLNL 公布的数据高出了 80%。所以有必要对高功率激光破坏大口径融石英玻璃的机理作进一步的研究。

本文从耦合波方程出发对 TSBS 进行了一些计算,得到了近似解析解。研究分析了高功率密度激光横向破坏大口径光学元件的机理,进而提出抑制 TSBS 等有害增益的方案。

2 实验现象

神光 II 第九路高功率激光系统是我国的大型固体激光装置,主要用于为 ICF 物理实验提供驱动激光。其能量和脉宽的技术指标为:基频能量 4500 J,脉宽 3 ns;三倍频能量 2250 J,脉宽 3 ns。

图 1 是进行激光系统三倍频达标实验的光路图。

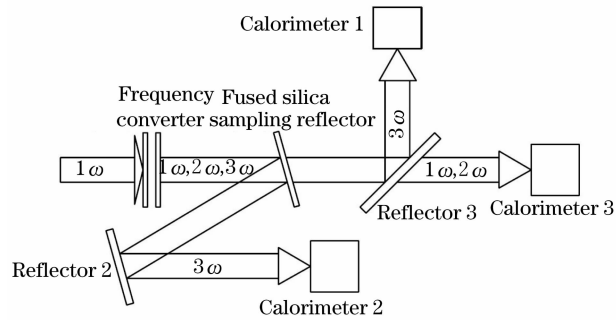


图 1 神光 II 第九路达标测试光路图

Fig. 1 Beampath geometry of the 9th beam of Shenguang-II performance testing

融石英取样镜的前表面不镀膜,反射率为 4%;后表面镀对基频光增透膜,对 3ω 反射率约为 17%。反射镜 2 镀反射分离膜滤除 1ω 和 2ω 光, 3ω 进入卡计 2。反射镜 3 前表面镀反射分离膜, 3ω 进入卡计 1, 1ω 和 2ω 光进入卡计 3。

在大能量运行时,根据实验测量结果计算得到的转换效率远远低于 50%(如表 1 所示)。观察到了取样融石英玻璃中心产生裂纹(图 2),而谐波转换系统没有出现异常。

由此可以断定由反射镜 1 反射进入反射镜 2 的 3ω 光小于 20%。能量损耗主要发生在融石英玻璃中:由于受激布里渊散射(SBS),导致可观的 3ω 光能量散射损失,这样经反射镜 2 进入卡计的激光能

量就小了。

实验中发现,当入射的基频能量在 1700 J 以上时,卡计 1 测得的激光能量大幅度的减小。此时,脉冲时间波形也开始出现变化,脉冲后沿出现下降趋势,但融石英反射镜没有任何损伤。

表 1 窄带(~ 0.001 nm)基频光入射测得三倍频效率

Table 1 Detected frequency conversion efficiency of narrow bandwidth(0.001 nm) 1ω incidence

1ω beam energy $E_{1\omega}/J$	3ω beam energy $E_{3\omega}/J$	Frequency conversion efficiency $\eta/\%$
1524.8	568	37.25
2157.0	817.02*	37.88*
2889.4	956.1*	33.09*
2952.4	1008.5*	34.16*
3155.3	970.2*	30.75*

Notes: “*” indicate a lot of energy having not been collected

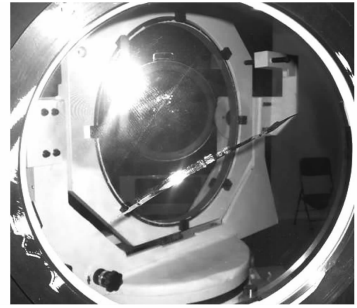


图 2 融石英取样镜中心裂纹

Fig. 2 Map of damaged fused silica sampling reflector

当基频光能量达到 2200 J 时,在反射镜 1 表面中心出现破坏点。当入射的基频能量达到 3155 J 的时候,反射镜 1 出现了裂缝,裂缝长度大约 20 cm,中心处的破坏已经深入到反射镜的后表面。这种现象与 Nova 系统出现的破坏现象非常相似。这时卡计 1 测得激光能量非常微弱,只有 100 多焦耳。

将入射到取样镜上的光束尺寸缩小为 $1/3$ 之后,测量系统中监测到的三次谐波的时间波形轮廓仍保持梯形,与基频光束的时间波形接近。此现象在二倍频的实验中并没有发现。由此可以判断 3ω 光诱导的 TSBS 是导致融石英玻璃破坏的主要原因。

3 TSBS 的理论模型

从耦合波方程出发对 TSBS 进行了一些计算^[8,9]。

SBS 的物理机制:电致伸缩介质密度变化—弹性声波的激发—光波和弹性声波间的参量作用过程(图 3)。经过慢变振幅近似处理的耦合耦合波方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \epsilon(\omega_s) + \frac{n}{c} \frac{\partial \epsilon(\omega_s)}{\partial t} + \frac{1}{2} \alpha \epsilon(\omega_s) = \frac{i\omega_s}{4cn_s \rho_0} \gamma \epsilon(\omega_p) \rho^*, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \epsilon(\omega_p) + \frac{n}{c} \frac{\partial \epsilon(\omega_p)}{\partial t} + \frac{1}{2} \alpha \epsilon(\omega_p) = \frac{i\omega_p}{4cn_p \rho_0} \gamma \epsilon(\omega_s) \rho, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (-i\Delta\omega + \frac{\Gamma_B}{2}) \rho = \frac{i\gamma \epsilon_0 k_b}{4\nu} \epsilon(\omega_p) \epsilon^*(\omega_s), \quad (3)$$

其中 $\Gamma_B = 1/\tau_B$ 为融石英玻璃中的声子寿命倒数, ν 为介质中的声波速度, ρ 和 ρ_0 为介质密度和平均密度, $\gamma = \rho_0(\partial\epsilon/\partial\rho)$ 为电致伸缩系数, α 为线性吸收系数, ϵ_0 为真空中的介电常数。

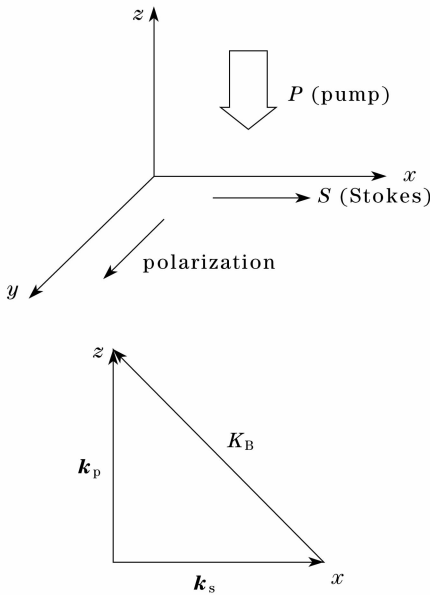


图3 横向往激布里渊散射示意图及相位匹配示意图

Fig. 3 TSBS schematic diagram & vector diagram

对方程(3)进行稳态处理

$$\rho = \frac{i\gamma \epsilon_0 K_B}{2\nu \Gamma_B} \frac{1}{1 - 2i\Delta\omega/\Gamma_B} \epsilon(\omega_p) \epsilon^*(\omega_s). \quad (4)$$

由光强公式 $I_j = \epsilon_0 c n |\epsilon_j|^2 / 2$, 同样对(1)、(2)式进行稳态处理, 不考虑线性损耗, 得到光强增益公式

$$\frac{dI_s}{dx} = g_B \sigma(\Delta\omega) I_s I_p, \quad (5)$$

$$\frac{dI_p}{dz} = -g_B \sigma(\Delta\omega) I_s I_p, \quad (6)$$

其中

$$g_B = \frac{\sqrt{2}\omega_s^2 \gamma^2}{2c^3 n \nu \rho_0 \Gamma_B}, \sigma(\Delta\omega) = \frac{1}{1 + (2\Delta\omega/\Gamma_B)^2}.$$

4 破坏阈值计算

532 nm波长的抽运光入射融石英时^[10], $\Gamma_{B532} =$

$168 \times 2\pi$ MHz。

对于 $\lambda = 351$ nm 的抽运光,

$$\frac{\Gamma_B}{\Gamma'_B} = \left(\frac{K_B}{K'_B}\right)^2 = \left(\frac{\sqrt{2}K_B}{2K'_B}\right)^2 = \left(\frac{\sqrt{2}n\lambda'}{2n'\lambda}\right)^2,$$

其中 K_B 为声子波矢量。 $\Gamma_B = 197 \times 2\pi$ MHz, 根据介电系数与玻璃折射率的关系近似有: $\frac{\gamma}{\gamma'} = \left(\frac{n}{n'}\right)^4$ 。

计算 SBS 增益系数得^[11]

$$g_B = \sqrt{2} \left(\frac{n}{n'}\right)^5 g_{B532} = \sqrt{2} \times \left(\frac{1.4767}{1.4607}\right)^5 \times 2.9 = 4.33 \text{ cm/GW}.$$

考虑激光在融石英玻璃中的线性损耗, 需要满足 $g_B I_p > \alpha \approx 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ TSBS 才能够产生, 所以要求 $I_p > 2.3 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$ 。对于神光 II 激光系统, 运行时的功率密度远远大于这个值。

由式(4)得

$$|\rho|^2 = \left(\frac{\gamma \epsilon_0 k_B}{2\nu \Gamma_B}\right)^2 \sigma(\Delta\omega) |\epsilon(\omega_p)|^2 |\epsilon(\omega_s)|^2 = \left(\frac{\gamma k_B}{c n \nu \Gamma_B}\right)^2 \sigma(\Delta\omega) I_s I_p, \quad (7)$$

$$\eta = \left(\frac{\gamma k_B}{c n \nu \Gamma_B}\right)^2 = 1.74 \times 10^{-28}.$$

融石英的抗拉强度为 $5 \times 10^7 \text{ Pa}$, $\sigma = 2E_Y |\rho| / \rho_0$, $E_Y = \nu^2 \rho = 7.8 \times 10^{10} \text{ Pa}$, 故应有: $|\rho| < 0.7 \text{ kg/m}^3$, $I_s = I_p \exp(g_B I_B x - 30)$ ^[8], 故破坏阈值 I_B 满足

$$\eta I_B \exp(g_B I_B x - 30) = |\rho|^2. \quad (8)$$

由于破坏最先出现在中心, 可以认为 Stokes 光是从光束边缘开始增益到中心处达到最大值。当入射到融石英取样玻璃的光束半径 $r = 0.155 \text{ m}$ 时(图4), 入射三倍频光强达到 $I_B = 6.31 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$ 时将导致融石英玻璃的超声破坏(图4)。而实验中, 取样玻璃中心发生点状破坏时, 基频光能量约为 2200 J, 对应三倍频光强约为 $I_B = 4.04 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$, 这个值约为理论阈值的 64%。

当窄带基频激光能量达到 3155 J 时, 三倍频转换效率约为 47%, 3ω 激光功率密度为 $6.55 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$, 融石英玻璃发生毁灭性破坏(图2), 可以认为主要原因是超声破坏。

Nova 实验光束口径 70 cm, 对应理论破坏阈值约为 $I_B = 2.89 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$ 。而其带宽约为 0.03×10^{-10} , 约为神光 II 窄带 ($\sim 0.01 \times 10^{-10}$) 的 3 倍, 而其发生破坏时激光功率密度约 $1 \times 10^{13} \text{ W/m}^2$ 约为神光 II $I_B = 4.04 \times 10^{12} \text{ W/m}^2$ 的 2.5 倍。所以可以

认为神光 II 融石英取样玻璃的破坏情况与 Nova 的情况基本一致。同时,我们可以认为国产融石英玻璃的抗破坏性能与美国基本在同一水平上。

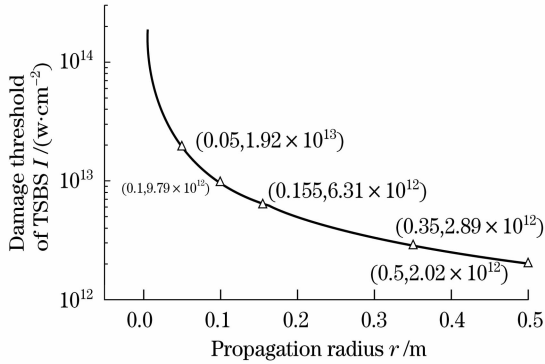


图 4 破坏阈值—增益半径的关系曲线

Fig. 4 Damage threshold versus propagation radius for TSBS

5 抑制 TSBS 的方法

光谱展宽后,能量频率分布范围扩大,单位频率对应的功率密度降低,选择适当的谱宽,就能防止高功率激光对玻璃元件造成破坏。从我国神光 II 第九路高功率激光系统同美国 Nova 的对比中可以验证这个结论。

为了抑制横向受激布里渊散射,一方面,可以通过对反射镜的外框进行改造,增加凹槽,以吸收 Stokes 散射光和应力波;另一方面,通过 Chirp 进行带宽调制,因为 SBS 的产生和激光的频带负相关。

借鉴 Nova 的经验,对基频光进行 30 GHz 的展宽,得到的实验结果如表 2 和图 5 所示:

表 2 带宽 0.1 nm 基频光入射的频率转换效率

Table 2 Frequency conversion efficiency of wide bandwidth(0.1 nm) 1ω incidence

1ω beam energy $E_{1\omega}/J$	3ω beam energy $E_{3\omega}/J$	Frequency conversion efficiency $\eta/\%$
979.7	289 *	29.50
2197.5	921.8 *	41.95
2809.0	1294.7 *	46.09
3489.0	1773	50.82
3809.6	2007	52.68
4331.0	2447	56.50

Notes: “*” indicate $E_{3\omega}$ is the sum of reading data on calorimeter 1 & 2; the others without “*” are the reading data on calorimeter 2 divided by the reflectivity of the fused silica sampling

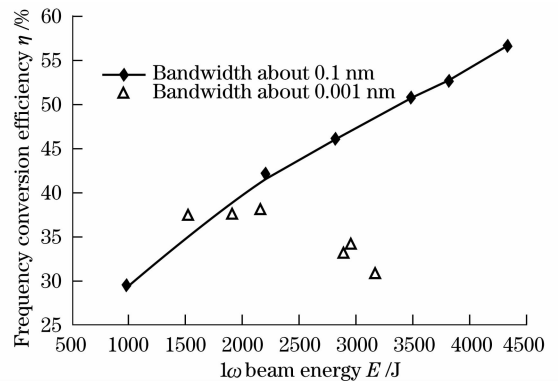


图 5 两种带宽激光的三倍频转换效率曲线

Fig. 5 Frequency conversion efficiency ($1\omega-3\omega$) plots for different bandwidths

6 讨 论

本文建立了 TSBS 的增益模型,获得了破坏阈值的稳态解析解。理论计算结果能够同时用于解释我国神光 II 第九路高功率激光系统同美国 Nova 装置的大口径融石英玻璃的破坏情况。根据理论分析结果,结合国际同行的经验,对基频光进行 30 GHz 的展宽,成功的抑制了 TSBS 效应对玻璃的破坏。在 30 GHz 的展宽是窄带运行时的 100 倍,由此可以推断,神光 II 第九路高功率激光系统可以运行在更高的能量水平而不会产生融石英玻璃的破坏。

参 考 文 献

- 1 J. R. Smith, I. R. Murray, D. T. Kyraizis *et al.*. Acoustic damage to large aperture optics[C]. *SPIE*, 1989, **1047**: 219~25
- 2 D. T. Kyraizis, T. L. Weiland. Determination of SBS induced damage limits in large fused silica optics for intense, time varying laser pulse[J]. *SPIE*, 1991, **1441**: 469~477
- 3 Yu Haiwu, Meng Shaoxian. Ultrasound model on damage of optical glasses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 1996, **16**(10): 1446~1450
於海武,孟绍贤. 光学材料破坏的超声模型[J], *光学学报*, 1996, **16**(10): 1446~1450
- 4 Guo Shaofeng, Lu Qisheng, Zhou Ping *et al.*. Numerical study on damage phenomenon induced by transverse stimulated Brillouin scattering[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(11): 3766~3770
郭少峰,陆启生,周萍等. 横向受激布里渊散射诱导破坏的数值研究[J], *物理学报*, 2004, **53**(11): 3766~3770
- 5 Guo Shaofeng, Lin Wenxiong, Lu Qisheng *et al.*. Experimental research on stimulated Brillouin scattering in fused silica glass [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(4): 2218~2221
郭少峰,林文雄,陆启生等. 熔融石英玻璃受激布里渊散射效应实验研究[J], *物理学报*, 2007, **56**(4): 2218~2221
- 6 Deng Shaoyong, Zhu Yongxiang, Guo Shaofeng *et al.*. Experiments of stimulated Brillouin scattering for pulse compression and energy reflectivity in K9 glass and fused silica [J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(2): 219~224
邓少永,朱永祥,郭少峰等. K9 玻璃与熔石英玻璃中纵向受激布里渊散射的脉宽压缩和能量提取效率[J], *中国激光*, 2007, **34**(2): 219~224

- 7 Gong Huaping, Lv Zhiwei, Lin Dianyang *et al.*. Influence of medium parameters on power limiting characteristic in stimulated Brillouin scattering process[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **5**(11): 674~676
- 8 M. J. Damzen, V. I. Vlad, V. Babin *et al.*. *Stimulated Brillouin scattering: Fundamentals and Applications* [M], Institute of Physics Pub, London, 2003
- 9 G. C. Valley. A review of stimulated Brillouin scattering excited with a broad-band pump laser[J]. *IEEE*, 1986, **QE-22**(5): 704~712
- 10 G. W. Faris, L. E. Jusinski, A. P. Hickman. High-resolution stimulated Brillouin gain spectroscopy in glasses and crystals[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(4): 587~599
- 11 Wang Zhijiang. *Applied Handbook of Optical Technology* [M]. Beijing: China Mechine Industry Press, 1994: 1084
王之江. 实用光学技术手册 [M], 北京: 机械工业出版社, 1994: 1084

《中国激光》“全固态激光技术”专题征稿启事

全固态激光技术是目前我国在国际上为数不多的从材料源头到激光系统集成拥有整体优势的高技术领域之一,随着全固态激光器件与材料研究的迅速发展,对激光先进制造技术、激光显示技术和激光医疗等领域的发展产生了巨大的推动作用,已取得大量研究成果。《中国激光》计划于2009年6月正刊上推出“全固态激光技术”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“全固态激光技术”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 激光二极管抽运固体激光器
- 光纤激光器
- 半导体激光器及相关技术
- 晶体材料及相关技术
- 光学薄膜技术
- 其他

截稿日期:2009年3月31日

投稿方式以及格式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgjjg.htm>)直接上传稿件(主题标明“全固态激光技术”投稿),也可直接将稿件电子版发至邮箱:zhgjg@mail.shcnc.ac.cn(主题标明“全固态激光技术”投稿),详情请参见中国光学期刊网:www.opticsjournal.net。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请发邮件至zhgjg@mail.shcnc.ac.cn询问。

《中国激光》编辑部