

文章编号: 0258-7025(2008)01-0021-06

抽运光参数对玻璃中受激布里渊散射 光能量提取效率的影响

邓少永¹ 郭少锋¹ 陆启生¹ 陈 燧² 林文雄² 林宗志²

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

摘要 以 K9 玻璃与熔石英玻璃代替传统的液体或气体作为纵向受激布里渊散射 (LSBS) 样品, 波长 1.064 μm , 脉宽可调的单纵模电光调 Q 激光器作抽运光, 实验探讨了抽运光脉宽、抽运光能量大小、抽运光脉冲重复频率对纵向受激布里渊散射脉宽压缩效应和散射光能量提取效率的影响。实验结果表明, 抽运激光脉冲重复频率高, 则散射光能量提取效率高; 脉宽小, 则散射光能量提取效率高; 焦距为 500 mm 时 300 mm 长的 K9 玻璃中得到的散射光能量提取效率比 170 mm 长的熔石英玻璃高; 在抽运光脉冲重复频率为 1 Hz 时, 二者都可以得到 90% 的散射光能量提取效率。探讨了抽运光为多纵模时, 固体介质中受激布里渊散射与光学击穿相伴发生的三种不同情况。实验证明, 多纵模情况下固体光学介质中同样可以发生受激布里渊散射; 多纵模情况下不一定会对固体光学介质产生光学击穿破坏; 光学击穿破坏的发生也不一定会阻止受激布里渊散射的发生, 二者可以相伴发生。

关键词 非线性光学; 受激布里渊散射; K9 玻璃; 熔石英玻璃; 重复频率; 散射光能量反射率; 多纵模

中图分类号 O 437.2; TN 248.1⁺3 **文献标识码** A

Influences of Characteristics of Pump Laser on Stimulated Brillouin Scattering Energy Reflectivity

Deng Shaoyong¹ Guo Shaofeng¹ Lu Qisheng¹

Chen Sui² Lin Wenxiong² Lin Zongzhi²

¹College of Opto-Electric Science and Technology,
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China
²Fujian Institute of Research on the Structure of Matter,
The Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China

Abstract Fused silica and K9 glasses were used for longitudinal stimulated Brillouin scattering (LSBS) instead of traditional medium of liquids or gases. A single longitudinal mode 1.064 μm laser which is electro-optical Q-modulation is used as pump laser. Influences of pulse duration, power and pulse repetition of pump laser on pulse compression of LSBS and energy reflectivity of scattering light were investigated. It is concluded that shorter pulse duration is with higher energy reflectivity and high pulse repetition gets higher energy reflectivity. At the same time, energy reflectivity of scattering in 300 mm K9 glass light is higher than that in 170 mm fused silica, when the focus length is 500 mm. And high energy reflectivity above 90% could be obtained in 170 mm fused silica long and 300 mm K9 glass when pump pulse repetition is 1 Hz. LSBS of pump laser with multi-longitudinal mode had been investigated in the experiments and it is proved that the optical breakdown could happen at the same time with SBS.

Key words nonlinear optics; stimulated Brillouin scattering; K9 glass; fused silica; pulse repetition; energy reflectivity; multi-longitudinal mode

收稿日期: 2007-04-06; 收到修改稿日期: 2007-08-20

基金项目: 国家 863 计划 (2002AA824091) 资助项目。

作者简介: 邓少永 (1979—), 女, 山东人, 博士研究生, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: sydeng_2004@163.com

导师简介: 陆启生 (1942—), 男, 江西人, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: Luqsheng@public.cs.hn.cn

1 引 言

D. T. Hon^[1]开始研究受激布里渊散射(SBS)的脉宽压缩效应获得超短脉冲的大功率激光,使一度中断的受激布里渊散射研究重新成为焦点。随着高能激光器的发展,基于纵向受激布里渊散射(LSBS)的脉宽压缩系统^[2~4]已开始用来产生超短脉冲高功率激光;以惯性约束聚变(ICF)激光驱动器为应用背景的研究更是热点^[5];受激布里渊散射相位共轭镜已应用于激光功率放大系统来校正激光波前畸变、改善激光光束质量^[6]。目前,以液体作为纵向受激布里渊散射介质的相位共轭系统和脉宽压缩系统均已较成熟;光纤中的纵向受激布里渊散射也得到了广泛应用,合理利用受激布里渊散射的相位共轭特性得到光纤相位共轭器^[7]并可实现光纤激光器的相干或非相干并束^[8,9],第三代光纤陀螺(SBS-FOG)也在研发中^[10]。但长的固体介质虽然纵向受激布里渊散射发生阈值低却很容易被破坏^[11]。美国贝尔实验室最早研究了受激布里渊散射对光纤通信的限制^[12],目前光纤激光器单根输出已达千瓦量级,再想提高输出功率并得到高光束质量已很难,困难也是纵向受激布里渊散射的发生。由于固体介质抗激光损伤能力较弱,所以对以固体作为纵向受激布里渊散射介质的研究并不成熟。俄罗斯联邦核子中心实验物理研究所的 Bel'kov 等^[13]已经对各向异性晶体中受激布里渊散射进行了探索性的理论和实验研究;Yoshida 等^[14]对熔石英中的纵向受激布里渊散射光能量提取效率等特性做了大量研究,利用长达300 mm的熔石英玻璃棒作为纵向受激布里渊散射介质,在入射能量高达580 mJ的情况下,无损伤获得了92%的能量反射率。但是,他们所使用的样品加工难度大,价格昂贵。选取普通的K9玻璃和国产JGS-1型熔石英玻璃,通过调整纵向受激布里渊散射实验系统的抽运光参数、聚焦参数和材料参数来把握纵向受激布里渊散射的规律,优化系统以得到较高的散射光能量提取效率。

2 实验原理

图1为实验原理图。单频1064 nm的Nd:YAG电光调Q激光脉宽为10~20 ns可调,振荡级输出能量为130 mJ,脉冲重复频率1~5 Hz可调。经过放大级后,激光能量可达500 mJ,光束半径6~9 mm,发散角较大。该激光器由中国科学院福建物质结构研究所提供。

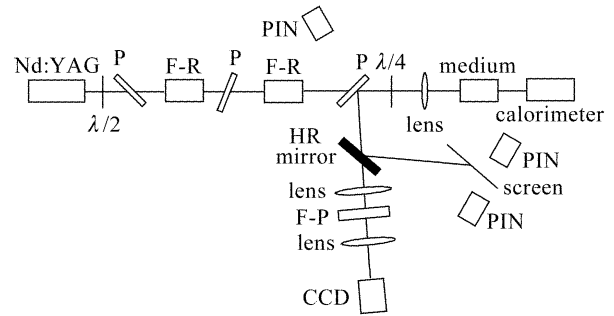


图1 实验原理图

Fig.1 Optic schematic diagram for LSBS

在后向受激布里渊散射的实验中,反向受激散射光可反馈到激光器内。由于散射光的频移量小于激光增益线宽,可通过激光器中的工作物质进一步得到受激放大,并重新入射到散射介质内。这使受激散射过程变得复杂,因此需采取多级反向光学隔离器。经过偏振片(P),法拉第(Farady)旋光晶体旋转器(F-R), $\lambda/4$ 波片组成的三级光隔离系统后,激光被一定焦距的透镜聚焦到玻璃样品中。为保证纵向受激布里渊散射尽量充分地发生,调光路时,使样品前后表面对抽运光的几何反射光均原路返回,即抽运激光正入射至样品内^[15,16]。考虑样品前后表面的几何反射率 β (不镀膜按3.5%,镀膜则按1%计算),从透镜后测得抽运光能量 E ,入射到介质内的抽运光能量即为 $E_P = E \cdot (1 - \beta)$,在样品后端面测到抽运光能量 E_1 , $E_T = E_1 / (1 - \beta)$ 即为透射抽运光能量;后向散射光能量即为 $E_{SBS} = E_P - E_T$, E_{SBS} / E_P 即为受激布里渊散射能量反射率。经验证^[15,16],这种算法得到的能量反射率是可信的。该方法优点在于,经过的光学器件少,算损耗时更精确。若测后向散射光能量,则由于经过的 $\lambda/4$ 波片和透镜对光的损耗都很大,在计算时引入的误差也大;由于样品、透镜和 $\lambda/4$ 波片对单程经过它的抽运光的几何反射光也会进入能量计,所以测到的散射光能量不准。

抽运激光、斯托克斯(Stokes)散射光和透射激光的脉冲波形通过Thorlabs公司的Det210 si探测器和D400fc AsGaIn探测器来检测,探测器的响应时间小于1 ns。其中D400fc AsGaIn探测器带宽1.5 GHz,可探测到更细节的信号;使用Teck公司的带宽1.5 GHz的TDS7154型示波器接收脉冲信号。抽运光和后向斯托克斯散射光通过法布里-珀罗(F-P)标准具(锐度大于312)形成的干涉条纹用Mitron公司的MTV-1881EX型CCD在焦距150 mm的透镜焦平面上采集。为保证抽运光脉宽

始终维持在某一固定值, 整个实验过程中锁定抽运电压, 能量的调节通过调节 $\lambda/2$ 波片来实现。光隔离器系统的隔离度为 30 dB。材料的破坏通过肉眼观测等离子体闪光和同轴光路的 He-Ne 激光的散射现象确认。实验选用 170 mm 长的熔石英玻璃和 300 mm 长的 K9 玻璃; 实验证实发生的确实是后向受激布里渊散射, 方法与文献[17]相同。

3 实验结果分析

调整激光器晶压和本振电压改变激光脉宽, 将抽运脉冲重复频率控制为 1 Hz。

调整激光器晶压 88 V, 本振电压 860 V 左右, 此时激光脉宽 18 ns。透镜焦距 500 mm; 透镜距介质前端面距离分别为 480 mm 和 400 mm, 焦点位于介质内近后端面, 调整抽运光入射至介质前端面的角度, 尽量确保抽运光正入射^[16]。由于抽运光能量不稳定, 会在 $\pm(2\sim 3)$ mJ 范围内起伏, 测到的散射光能量提取效率也有起伏。为使所测数据尽量可信, 每次固定抽运能量在某一值上时, 记录 3~5 次结果取平均, 由此计算得到散射光能量提取效率。通过光学器件的衰减, 入射至介质前端面的抽运光能量最大只能达到 340 mJ 左右。从图 2 给出的后向斯托克斯散射光能量提取效率随抽运能量增大的变化曲线来看, 散射光能量提取效率已达到饱和状态; 但分析散射光能量提取效率的发展趋势, 可以明显看到, 随着抽运光能量的增大, 散射光能量提取效率也必然提高。提高激光器晶压至 98 V, 本振电压 957 V, 此时入射至介质前端面的抽运光能量可以达到 480 mJ, 抽运光脉宽 12 ns。图 2 (a) 给出的是长 170 mm 的熔石英玻璃中不同抽运光脉宽对散射光能量提取效率的影响; 而图 2 (b) 给出了长 300 mm 的 K9 玻璃中不同抽运光脉宽对散射光能量提取效率的影响。脉宽为 12 ns 比脉宽为 18 ns 的抽运光产生的后向斯托克斯散射光能量提取效率高, 即抽运光脉宽小, 则纵向受激布里渊散射光能量提取效率高。主要原因是, 抽运光脉宽小, 则光能量相同的条件下, 抽运脉冲的峰值强度大, 使纵向受激布里渊散射增益过程建立得快, 发生得早, 效率高。

采用了两种不同的抽运光脉冲重复频率: 5 Hz 和 1 Hz。固定抽运光晶压 88 V, 本振电压 850~860 V, 保持抽运光脉宽为 18 ns, 透镜焦距 500 mm。对 170 mm 的熔石英和 300 mm 的 K9 玻璃研究表明, 透镜距介质前端面的距离依然是 480 mm 和 400 mm。

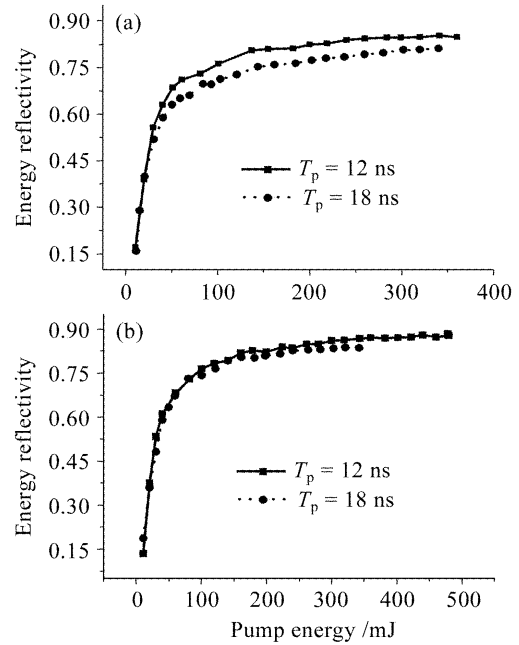


图 2 抽运光脉宽对散射光能量提取效率的影响
(a) 熔石英玻璃, 长 170 mm; (b) K9 玻璃, 长 300 mm
Fig. 2 Influences of pump energy on energy reflectivity
(a) fused silica, 170 mm; (b) K9 glasses, 300 mm

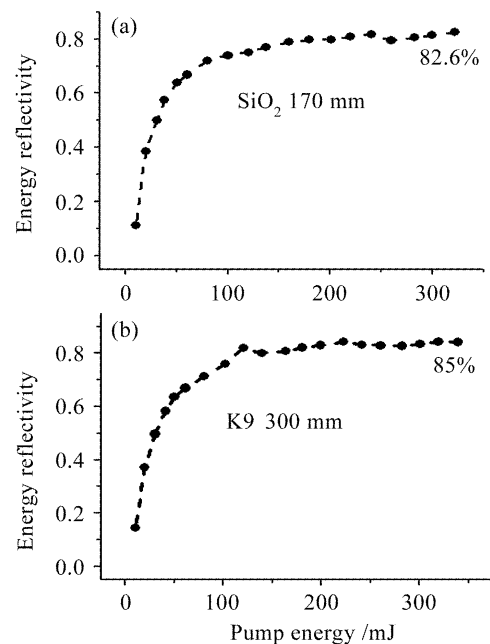


图 3 抽运光脉冲重复频率 5 Hz 时抽运光能量对
散射光能量提取效率的影响
Fig. 3 Influences of pump energy on energy reflectivity
for pulse repetition of 5 Hz

在重复频率为 5 Hz 的情况下, 实验测得的散射光能量提取效率如图 3 所示。将图 3 与图 2 对应的抽运光重复频率为 1 Hz 的实验结果相对比可以看到, 重复频率高则散射光能量提取效率稍高。通过在相纸上打出的抽运光光斑大小变化来看, 这主要是因为激光器重复频率不同, 工作物质的热积累程

度不同,抽运光场的径向分布受热透镜效应的影响程度不同;本实验采用的激光器体现出的是热透镜的会聚作用,这使重复频率为5 Hz时的激光光束半径小于1 Hz的情况,因此抽运光能量相同时,重复频率为5 Hz时单脉冲对应的抽运光光强比1 Hz时大,这使纵向受激布里渊散射过程发生得更充分,散射光能量提取效率也就更高。

激光器重复频率最高只有5 Hz,每发脉冲持续时间只有30~34 ns,脉冲间隔大于100 ms,而纵向受激布里渊散射效应就发生在纳秒量级,因此每发抽运激光脉冲产生的纵向受激布里渊散射效应不会重叠累积。这一结论可以由实验结果(包括散射光能量提取效率和散射光脉冲波形、干涉条纹)的可重复、误差小这两点得到证明^[17]。可以认为多脉冲作用和单脉冲作用效果相同。随着抽运光能量的增大,受激布里渊散射光能量提取效率提高。无论是170 mm的熔石英玻璃还是300 mm的K9玻璃,都可以很容易得到80%以上的散射光能量提取效率。

对比以上每组图可以发现,在焦距为500 mm的情况下,从300 mm的K9玻璃中得到的后向斯托克斯散射光能量提取效率较高。实际上,焦距不同,介质长度对散射光能量提取效率的影响不同。选取合适的聚焦参数,在抽运光脉冲重复频率为1 Hz时,在170 mm熔石英玻璃和300 mm的K9玻璃中都可以得到90%的散射光能量提取效率。由于实验采用的抽运激光器无法做到重复频率10 Hz,而且激光的横模模式不理想^[17],抽运能量也无法做到更高,无法与Yoshida等^[14]的实验结果做出平等对比。但根据实验结果推测,在激光脉冲重复频率达到10 Hz,抽运能量为540 mJ时,在170 mm的熔石英玻璃和300 mm的K9玻璃中也可以得到92%的散射光能量提取效率。实验结果再次说明了廉价的K9玻璃可以代替同等长度的生长难度较大、难以保证均匀光学特性、较昂贵的熔石英玻璃,获得较高的散射光能量提取效率。

由于纵向受激布里渊散射发生阈值较高,相同能量的多纵模激光在固体介质中很难建立充分的纵向受激布里渊散射;另外,多纵模激光容易引发光学击穿对固体介质造成不可逆的破坏,同时光学击穿的发生大大损耗了抽运光能量,纵向受激布里渊散射所需的高阈值更难达到,因此多纵模情况下很难在固体介质中探测到纵向受激布里渊散射现象^[18]。多纵模也可以发生充分的纵向受激布里渊散射。抽运激光为多纵模时,熔石英或K9玻璃中的纵向受

激布里渊散射分为三种情况:1)发生纵向受激布里渊散射的同时介质未被破坏;下一发抽运脉冲仍发生了纵向受激布里渊散射,介质仍未被破坏;2)发生纵向受激布里渊散射的同时介质被宏观破坏;下一发抽运脉冲介质宏观破坏稍有累加,但仍会发生纵向受激布里渊散射;3)发生纵向受激布里渊散射的同时介质未被宏观破坏;下一发抽运脉冲未发生纵向受激布里渊散射,介质宏观破坏加剧。

实验采用重复频率5 Hz,脉宽12 ns的抽运光。透镜焦距500 mm(实际焦距540~560 mm)。多纵模情况下,抽运光斑强度径向分布和干涉条纹如图4所示。

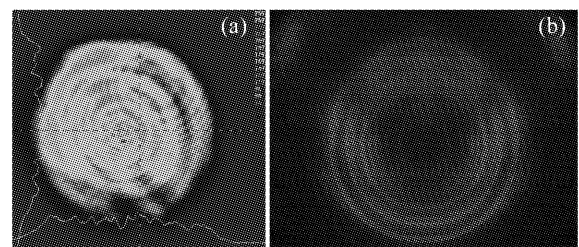


图4 抽运光光强的径向分布(a)及干涉图样(b)
Fig. 4 Characteristics of pump laser beam (a) and interference stripes (b)

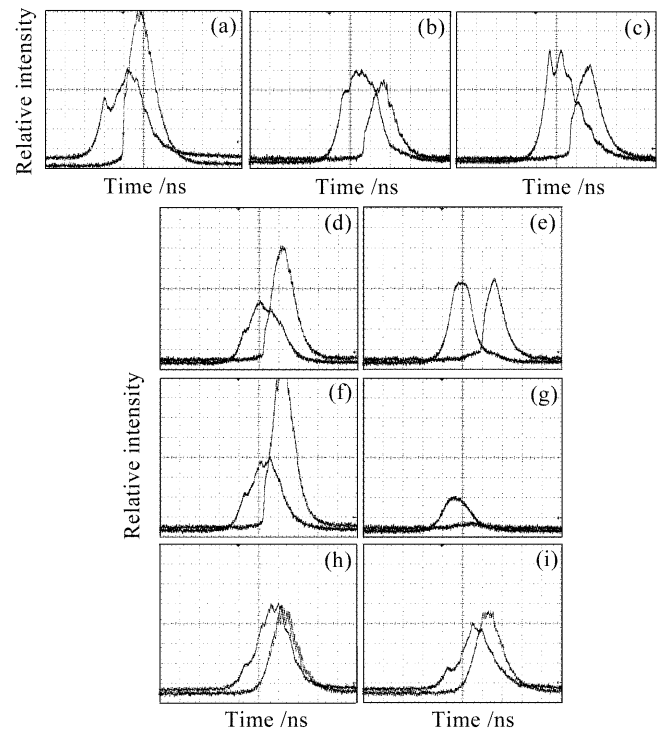


图5 多纵模对应的散射光脉冲波形和透射光脉冲波形
Fig. 5 Longitudinal multimode pulses of scattering light and transmission light

图5(a)~(c)给出了三种不同情况下,介质中多纵模的纵向受激布里渊散射透射光和散射光脉冲波形。图5(a)没有脉冲前沿压缩现象的是抽运光

从介质后端面透射的脉冲;图 5(b),(c)脉冲前沿明显被压缩的是后向斯托克斯散射光脉冲。图 5(a)对应的实验条件是:170 mm长的熔石英玻璃,后端面镀增透膜,透镜距介质前端面距离463 mm,抽运光能量大于140 mJ;图 5(b)对应的实验条件:100 mm长的熔石英玻璃,透镜距介质前端面距离513 mm,抽运光能量大于70 mJ;图 5(c)对应的实验条件:100 mm长的 K9 玻璃,透镜距介质前端面距离513 mm,抽运光能量大于70 mJ。三种情况均未发现宏观破坏,且再打一发单纵模抽运光脉冲时依然发生纵向受激布里渊散射,且未发现破坏迹象。表明多纵模激光也可以发生纵向受激布里渊散射效应并不对固体光学透明介质造成破坏。但严格来说,单纵模与多纵模激光在介质内的焦点位置可能不同,若单纵模激光焦点在多纵模激光焦点之前,则单纵模激光大部分能量转化为后向斯托克斯散射光离开介质;即使前面的多纵模已经对介质造成了微观破坏,单纵模透射光经过此微观破坏点时,也可能因强度太低而不会对介质造成更严重的宏观破坏。

对 100 mm 长的熔石英玻璃,透镜距介质前端面513 mm,抽运光能量大于100 mJ。图 5(d)对应的情况是,第一发抽运脉冲为多纵模,介质中发生了纵向受激布里渊散射但介质同时被光学击穿,出现宏观破坏形貌。图 5(e)是第二发抽运脉冲为单纵模,在前一发脉冲带来了宏观破坏的情况下,依然发生了纵向受激布里渊散射。图 5(d)的结果表明纵向受激布里渊散射的阈值应当低于光学击穿,只是在某一时刻,某一条纵模谱线对应的能量密度很大,超越了光学击穿阈值,发生了光学击穿;光学击穿的发生消耗了部分抽运光能量,抽运光强低于光学击穿阈值却高于纵向受激布里渊散射发生阈值,因此纵向受激布里渊散射照样发生。图 5(e)则说明介质的宏观破坏不一定会阻碍纵向受激布里渊散射的发生。但是,若前一发脉冲带来了宏观破坏,则因为破坏点介质光学结构的破坏,对光场的吸收系数变大,又由于纵向受激布里渊散射过程对抽运光场的消耗,第二发脉冲的透射光脉冲变得很光滑,脉冲前沿不再有小尖刺。

介质选用 100 mm 长的 K9 玻璃,透镜距介质前端面的距离仍为 513 mm,抽运光能量大于 120 mJ。图 5(f)是第一发抽运脉冲作用后的结果,介质发生了光学击穿,但纵向受激布里渊散射过程产生的斯托克斯散射光脉冲仍然很强。图 5(g)是紧接着打了一发抽运脉冲后的结果。第二发脉冲作

用过程中,听到介质发出了爆裂的声音,无后向散射光返回。这说明前一发的宏观破坏比较严重,后一发抽运脉冲入射到介质内部后,大部分被介质破坏处吸收或参与了光学击穿,因此得到的透射抽运光脉冲波形均是光滑的波包(如图 5(g)与(e)所示),这一特征是光学击穿破坏的一个判据。

实验还发现,多纵模的纵向受激布里渊散射同样可以达到饱和状态(如图 5(h),(i)所示)。取 170 mm 长的熔石英玻璃,抽运光能量大于 170 mJ。图中透射光脉冲波形符合纵向受激布里渊散射的特点,散射光脉冲波形却不存在前沿陡升的脉宽压缩特点,但仍可确定发生了纵向受激布里渊散射。图 5(h)和(i)中右边的脉冲波形并非实验光路对抽运光的几何反射光,这是因为几何反射光很弱,若未发生纵向受激布里渊散射,则如图 5(g)的情况,只能得到抽运光的透射光脉冲,在测散射光的探测器中几乎测不到任何光脉冲波形。

4 结 论

- 1) 在抽运光脉冲重复频率较低的情况下,多脉冲作用不存在累加效应,与单脉冲作用结果相同;
- 2) 在抽运能量等参数相同的情况下,抽运光脉宽小,则纵向受激布里渊散射过程发生得更充分,散射光能量提取效率更高;
- 3) 由于激光器工作物质内热透镜会聚作用的影响,激光器脉冲重复频率不同,在相同的抽运能量作用下,纵向受激布里渊散射过程产生的散射光能量提取效率不同:重复频率高,抽运光斑尺寸小,散射光能量提取效率高;
- 4) 抽运光为多纵模时,仍可在熔石英和 K9 玻璃中产生纵向受激布里渊散射效应,而且在一定实验条件下可以达到饱和;
- 5) 光学击穿破坏的存在不一定会阻止纵向受激布里渊散射的发生。

参 考 文 献

- 1 David T. Hon. Pulse compression by stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(12):516~518
- 2 C. Brent Dane, William A. Neuman, Lloyd A. Hackel. High-energy SBS pulse compression [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(8):1907~1915
- 3 Stephan Schiemann, Wim Ubachs, Wim Hogervorst. Efficient temporal compression of coherent nanosecond pulses in a compact SBS generator-amplifier setup [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(30):358~366
- 4 V. Babin, A. Mocofanescu, V. I. Vlad *et al.*. Analytical treatment of laser-pulse compression in stimulated Brillouin

- scattering [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(1):155~163
- 5 Zhang Hua, Fan Dianyuan. Application of stimulated Brillouin scattering to ICF laser drivers [J]. *Laser Journal*, 2000, **21**(2):7~9
张 华, 范滇元. 受激布里渊散射在 ICF 激光驱动器中的应用 [J]. *激光杂志*, 2000, **21**(2):7~9
- 6 Norman A. Kurnit, Scott J. Thomas. Application of a phase-conjugation Brillouin mirror to generation of high-quality variable-duration KrF pulses [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(3):421~429
- 7 Chen Jun, Zhou Tao, Zhu Qi. Numerical analysis of temporal stimulated Brillouin scattering in optical fiber [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(1):65~69
陈 军, 周 涛, 朱 琦. 光纤中的瞬态 SBS 过程的数值分析与探讨 [J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(1):65~69
- 8 Bryan J. Choi. Investigation of Laser Beam Combining and Clean-Up via Seeded Stimulated Brillouin Scattering in Multimode Optical Fibers [D]. Air Force Institute of Technology, Ohio, 2000
- 9 Timothy H. Russell, Won B. Roh, John R. Marciante. Incoherent beam combing using stimulated Brillouin scattering in multimode fibers [J]. *Opt. Express*, 2001, **8**(2):246~254
- 10 Yan Fengping, Shan Ying, Jian Shuisheng. Study on threshold power of the fiber source for the stimulated Brillouin scattering fiber optic gyros [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(9):790~794
严凤平, 单 英, 简水生. 受激布里渊散射光纤陀螺中光纤源的阈值功率研究 [J]. *中国激光*, 2000, **A27**(9):790~794
- 11 Deng Shaoyong, Guo Shaofeng, Lu Qisheng *et al.*. Influence of pulse duration and interaction length on transient SBS induced damage [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(11):1041~1046
邓少永, 郭少锋, 陆启生 等. 激光与材料参数对瞬态 SBS 诱导的激光超声破坏效果的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(11):1041~1046
- 12 E. P. Ippen, R. H. Stolen. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**(11):539~540
- 13 S. A. Bel'kov, S. V. Bondarenko, Yu. V. Dolgoplov *et al.*. Investigation of the transverse SBS excitation in anisotropic crystals [C]. *SPIE*, 1996, **2771**:43~52
- 14 Hidersugu Yoshida, Hisanori Fujita, Masahiro Nakatsuka *et al.*. High resistant phase-conjugated stimulated Brillouin scattering mirror using fused silica glass for Nd:YAG laser system [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1999, **38**(5A):L521~L523
- 15 Guo Shaofeng, Lin Wenxiong, Lu Qisheng *et al.*. Experimental research on stimulated Brillouin scattering effect in fused silica glass [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(4):2218~2222
郭少锋, 林文雄, 陆启生 等. 熔石英玻璃中受激布里渊散射效应实验研究 [J]. *物理学报*, 2007, **56**(4):2218~2222
- 16 Guo Shaofeng. Inject seeded single axial and transverse mode Q-switched laser and high efficiency stimulated Brillouin scattering in fused silica glass [R]. 2005. 23
郭少锋. 种子注入式单纵单横脉冲激光器及其泵浦的高效固体受激布里渊散射研究 [R]. 2005. 23
- 17 Deng Shaoyong, Chen Sui, Zhu Yongxiang *et al.*. Experiments of SBS for pulse compression and energy reflectivity in K9 glass and fused silica [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):219~224
邓少永, 陈 隧, 朱永祥 等. K9 玻璃和熔石英玻璃中纵向受激布里渊散射脉宽压缩和能量提取效率的实验研究 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(2):219~224
- 18 Guo Shaofeng. Damage Mechanism Induced by Intense Laser in Optical Materials [D]. Changsha: National University of Defence Technology Press, 2003. 119
郭少锋. 强激光对光学材料的破坏机制 [D]. 长沙: 国防科学技术大学出版社, 2003. 119