

光束相干驱动声子场提高 SBS 相位 共轭保真度稳定性*

何伟明 吕志伟 王 骥 马祖光

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所 哈尔滨 150001)

提要 光束相干引起的电致伸缩能驱动声子波,从而能加强受激布里渊散射(SBS),提高相位共轭保真度稳定性。对折反池结构,采用 2 ns 陡前沿的脉冲光泵浦,将双级钕玻璃放大器和 SBS 池作为整体,测量了其相位共轭保真度。观测到输出激光的能量远场空间分布和相位共轭保真度稳定性在光束夹角 $\theta \cong 5 \text{ mrad}$ 时明显优于 $\theta > 30 \text{ mrad}$ 。

关键词 受激布里渊散射,相位共轭保真度,光束相干驱动

普通结构的受激布里渊散射(SBS)的共轭(PC)声子模是从噪声中发展起来的,在泵浦功率密度较高时,受到光学击穿、拉曼散射和自聚焦效应等非线性过程的竞争^[1],其产生的SBS相位共轭保真度起伏较大,虽然采用双池结构和环形结构能改善其稳定性^[2-4],但对几个纳秒的高功率短泵浦脉冲,这些结构仍不理想。文献[1]指出SBS相位共轭保真度对泵浦脉冲前沿的上升斜率是很敏感的,对于一个脉宽即使比介质声子寿命长的泵浦激光,若其前沿上升时间接近或小于介质声子寿命,则其SBS相位共轭保真度是不稳定的。

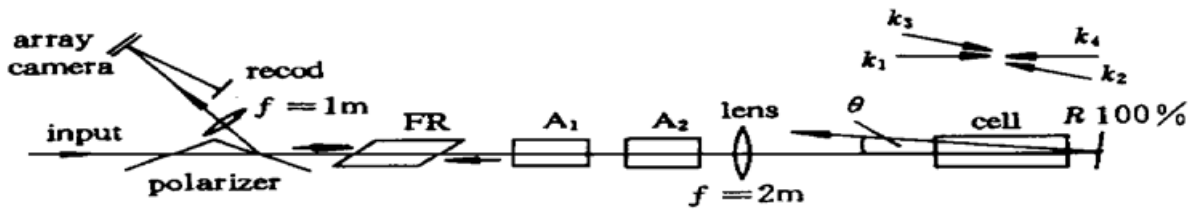


图 1 实验光路图

FR: 菲涅耳棱体; A_1, A_2 : 玻璃放大器; K_1, K_2 : 泵浦束; K_3, K_4 : 产生的SBS束

Fig. 1 Experimental arrangement

FR: Fresnel rhombus; A_1, A_2 : glass amplifiers; K_1, K_2 : the pump beams; K_3, K_4 : the produced SBS beams

采用四波混频加强SBS的方法^[5]一定程度上可克服这些缺点,其相干光拍频驱动声子场,能提高SBS相位共轭保真度稳定性。折反池结构是一种较为简单的加强SBS的方法,图1为其实验光路。输入光束为脉宽8 ns, 10~90%上升前沿为2 ns,能量约为5 mJ的单横模、单

* 国家高技术惯性约束聚变主题和国家自然科学基金以及哈尔滨工业大学科学基金的资助项目。

纵模激光, 经由两片镀膜偏振镜和菲涅耳棱体组成的隔离器后, 线偏振光变为圆偏振光, 并被两级钽玻璃放大器放大。放大输出的激光能量约为 50 mJ, 由焦距为 2 m 的透镜缩束, 进入充以 CCl₄ 介质的布里渊池(池长 10 cm, 其前端面距透镜 1.55 m), 池端面光束直径为 2 mm, 平均泵浦功率密度约为 200 MW/cm²。透过布里渊池的激光被一平面全反镜所反射, 全反镜距池后端约 10 cm, 反射光与人射光夹角为 θ 。产生的 SBS 散射激光原光路返回, 并由偏振镜侧向输出。

在布里渊池中, 入射激光 K_1 与反射激光 K_2 及其产生的 SBS 散射激光 K_3, K_4 相互干涉, 干涉项将由电致伸缩驱动声子波, 如忽略温度效应, 声子波的运动方程^[5]为:

$$-\eta \frac{\partial U}{\partial t} + T \nabla^2 U + \frac{1}{2} \gamma \nabla (\sum_j \epsilon_j)^2 = \rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad (1)$$

其中第一项为粘滞阻尼力, 第二项为弹性力, 第三项为电致伸缩驱动力(η 为粘滞系数, T 为弹性系数, γ 为电致伸缩系数, ρ 为密度, U 为偏离平衡位置的位移)。假如激光、散射光均为平面波, 其电场为

$$\epsilon_j = \frac{1}{2} E_j(r) \cdot \exp\{i(\omega_j t - K_j \cdot r)\} + \text{cc.} \quad j = 1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

$$\omega_1 = \omega_2, \quad \omega_3 = \omega_4 = \omega_1 - \Delta\omega$$

介质中总光强 $(\sum_j \epsilon_j)^2$, 其展开式包含下面两个含时干涉项:

$$\frac{1}{2} E_1 E_3^* \exp[i(\Delta\omega t - K_{s1} \cdot r)] + \frac{1}{2} E_2 E_4^* \exp[i(\Delta\omega t - K_{s2} \cdot r)] + \text{cc.} \quad (3)$$

其中 $K_{s1} = K_1 - K_3, K_{s2} = K_2 - K_4$ 。在此干涉项驱动下, 方程(3) 应有如下形式的解

$$U = \frac{1}{2} u_j(r) \exp[i(\Delta\omega t - K_{sj} \cdot r)] + \text{cc.} \quad (4)$$

代入(1)后得到

$$\left[-i\alpha \frac{\Delta\omega}{\omega_j} - K_{sj} \left(1 - \frac{\Delta\omega^2}{\omega_j^2} \right) \right] u_j - \frac{2i\Delta\omega}{\omega_j v_s} \frac{\partial u_j}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{i\gamma A_j}{\rho v_s^2} \quad (5)$$

这里 $T/\rho = v_s^2, \eta/\rho v_s = \alpha, A_1 = E_1 E_3^*, A_2 = E_2 E_4^*, \omega_j = K_{sj} v_s$ 。其中 v_s 为声子速度, α 为声子衰减长度, ω_j 为波矢 K_{sj} 的声子频率。由于 $\Delta\omega$ 为泵浦光与 SBS 散射光的频差, 所以 $\Delta\omega \cong \omega_j$, 这样干涉条纹将以接近于声子速度传播, 从而在干涉区激发起 PC 声子模, 抑制噪声及其它非线性效应的竞争, 可望在大区域内产生稳定的 SBS 相位共轭保真度。

由于 SBS 应用在激光器中, 是以多程放大的形式来补偿光学元件引起的相位畸变的, 所以我们将两级钽玻璃放大器 A_1, A_2 和布里渊池 cell 作为整体来考察输入输出激光的相位保真度。相位保真度是通过列阵相机测量激光束能量远场空间分布而获得的。这种方法与文献[1]报道的穿孔法相比, 数据点的获取较复杂, 但其调整简单, 获取的信息多。选用紫外示波纸记录激光列阵点, 在平均发散角(70% 能量) 范围内, 激光能量比率的测量误差在 5% 以内, 因而其测量精度与穿孔法用能量计直接测量的精度相近。

对于所测输入输出激光的能量远场空间分布, 一般选取输入激光列阵图中 85% 能量处的发散角作为测量基准, 通过测量输出激光在该发散角内的激光能量比率, 该比率与 85% 之比即为相位共轭保真度。在图 1 光路中, 输入激光 85% 能量内的发散角为 0.2 mrad。图 2 为在 $\theta \cong 5$ mrad (图 2(a)) 和 $\theta > 30$ mrad (图 2(b)) 两种情况下多次测得的输出激光束能量远场空间分布, 即在不同发散角范围内光束能量占总光束能量的比率。当小角度反射, $\theta \cong 5$ mrad, 入

射光和反射光大部分能在池中重叠因而泵浦光和 SBS 散射光的干涉驱动并加强了 PC 声子模, 测得的激光束能量远场空间分布比较稳定; 而当大角度反射, $\theta > 30$ mrad, 入射和反射光基本在池中不重叠, PC 声子模受到噪声的扰动, 从而测得的激光束能量远场空间分布稳定性相对较差。表 1 为以发散角 0.2 mrad 为标准, 测量所得的输出激光相位共轭保真度。可见, 光束的拍频相干驱动声子场, 提高了 SBS 相位共轭保真度的稳定性。

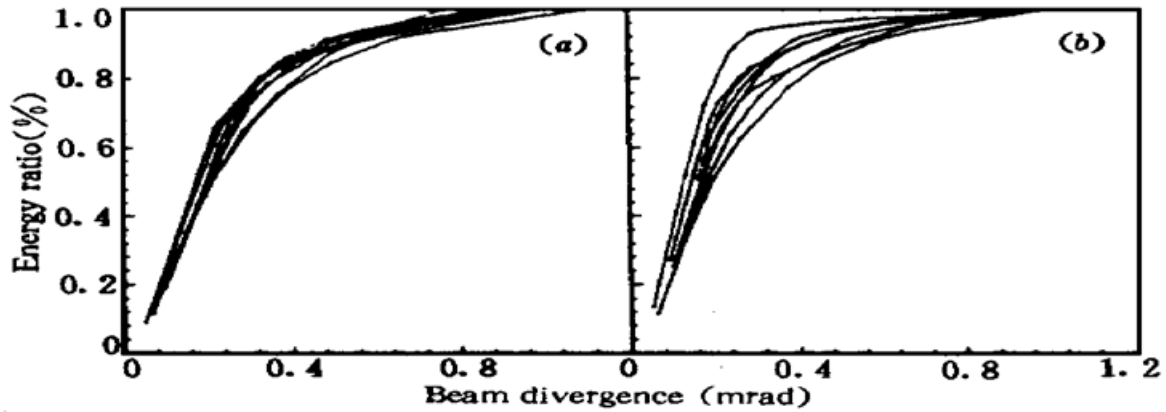


图 2 (a) $\theta \cong 5$ mrad; (b) $\theta > 30$ mrad 时的输出 SBS 光束发散角

Fig. 2 Output SBS beam divergence for (a) $\theta \cong 5$ mrad; (b) $\theta > 30$ mrad

表 1 测得的相位共轭保真度

Table 1 Measured PC fidelity

Reflecting angle θ	PC fidelity (%)										mean	standard deviation	coefficient of variation
5 mrad	67.6	64.7	55.3	56.8	57.6	57.0	56.5	61.2	67.6	55.6	59.9	4.6	7.7%
> 30 mrad	91.8	64.1	60.6	77.6	71.2	77.6	82.9	72.9			74.8	9.4	12.5%

由此我们得出以下结论:

1) 由于 SBS 池长较短, 且泵浦激光功率密度只有 $200 \text{ MW}/\text{cm}^2$, 测得的 SBS 的转换效率较低, 只有 10% 左右。适当加长 SBS 池及增大泵浦激光功率, 能进一步提高 SBS 的转换效率。

2) 在 $\theta \cong 5$ mrad 时的相位共轭保真度稳定性比 $\theta > 30$ mrad 时的相位共轭保真度稳定性要高, 这与理论分析一致。对于 $\theta > 30$ mrad, 由于声子模从噪声中发展起来, 而又受到噪声的扰动, 因而其产生的 SBS 相位共轭保真度有很大的随机性, 其测量值偶尔可能出现较大的数值, 从而从表 1 中看到其相位共轭保真度测量平均值要比在 $\theta \cong 5$ mrad 时的测量平均值稍高些。对于一个可实际应用的 SBS 系统来讲, SBS 的相位共轭保真度稳定性尤为重要。

3) 光束相干驱动并加强共轭声子模的技术, 可以在较大的泵浦激光区域内实现稳定的相位保真度, 因而可以提高 SBS 池对激光能量的承受能力; 另外, 这种池结构很紧凑, 适合于几纳秒的短脉冲泵浦。所以, 在这些方面, 它比 SBS 双池结构更为优越, 可望应用在高功率激光系统中, 但目前总的转换效率不够高, 以后我们将采用双频脉冲泵浦的方法加以改善。

参 考 文 献

- phase-conjugation fidelity for high input energies. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(18) : 1271~ 1273
- 2 N. F. Andreyev, E. A. Khazanov, O. V. Palashov *et al.*. Phaseconjugation fidelity fluctuations for various stimulated-Brillouin-scattering mirror geometries. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(5) : 786~ 788
 - 3 M. S. Mangir, D. A. Rockwell. 4.5 J Brillouin phase-conjugate mirror producing excellent near- and far-field fidelity. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(8) : 1396~ 1400
 - 4 G. J. Crofts, M. J. Damzen, R. A. Lamb. Experimental and theoretical investigation of two-cell stimulated-Brillouin-scattering systems. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(11) : 2282~ 2288
 - 5 A. M. Scott, M. S. Hazell. High-efficiency scattering in transient Brillouin-enhanced four-wave mixing. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1986, **QE-22**(8) : 1248~ 1257

Beam Interference Driving Acoustic Wave Enhances the Stability of SBS Phase-conjugation Fidelity

He Weiming Lü Zhiwei Wang Qi Ma Zuguang

(*Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*)

Abstract The electrostrictive force induced by beam interference can drive the acoustic wave, and enhance the stability of stimulated Brillouin scattering (SBS) phase-conjugation fidelity. For the reflecting-cell configuration pumped with a 2ns steep leading edge laser pulse, taking a two-stage Nd glass amplifier and a SBS cell as a whole, it is shown that the measured far-field distribution and phase conjugation fidelity of the output laser beam are more stable for $\theta \cong 5$ mrad than those for $\theta > 30$ mrad.

Key words stimulated Brillouin scattering, phase-conjugation fidelity, beam interference drive