

文章编号: 0258-7025(2003)06-0512-03

# 双频抽运提高 SBS 相位共轭保真度

杨 珺, 何伟明, 吕月兰, 吕志伟

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 相位共轭保真度是相位共轭镜技术用于强激光系统中的一个重要指标。采用四波混频加强 SBS 的方法, 其相干拍频驱动声子场, 能提高 SBS 相位共轭保真度。对于双频单池结构, 使用列阵相机测量激光束能量远场角分布, 在 SBS 转换效率最佳时, 对相干驱动 SBS 相位共轭保真度进行了实验研究。

**关键词** 非线性光学; 相位共轭保真度; 受激布里渊散射; 四波混频; 相干驱动

**中图分类号** O 437.2      **文献标识码** A

## Enhancing SBS Phase-conjugation Fidelity by a Special Dual Spectral-line Pump

YANG Jun, HE Wei-ming, LÜ Yue-lan, LÜ Zhi-wei

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** An important parameter characterizing phase-conjugation technology used in the powerful laser system is the phase-conjugation fidelity. Brillouin-enhanced four-wave mixing, whose interference beat frequency drives an acoustic field, can improve the SBS phase-conjugation fidelity. For the double-frequency single-cell configuration, using array camera, the experiments are carried out on the phase-conjugation fidelity of beam interference driving SBS when the SBS conversion efficiency is optimal.

**Key words** nonlinear optics; phase-conjugation fidelity; stimulated Brillouin scattering; four-wave mixing; beam interference drive

### 1 引 言

相位共轭镜技术可以改善激光束质量, 尤其在强激光系统中, 高的相位共轭保真度能确保完全补偿多程放大中的相位畸变。获得相位共轭的最普通的方法就是受激布里渊散射(SBS)和四波混频(FWM)。SBS的结构简单, 转换效率高, 便于实用。普通的SBS所激发的声子场是从噪声中发展起来的, 其相位共轭保真度存在一定的起伏, 并且超阈值抽运时受到其他非线性效应的影响, 降低了相位共轭保真度, 此外对窄脉冲( $\sim 1\text{ns}$ )光束抽运不合适<sup>[1,2]</sup>。据报道, 普通的单池SBS平均相位保真度 $\sim 30.7\%$ , 且起伏很大; 一般的振放双池SBS, 其平均保真度 $\sim 70.1\%$ ; 保真度最高的双聚焦振放双池

SBS, 其平均保真度也只有 $77.1\%$ <sup>[1]</sup>。而FWM理论上共轭光是 $100\%$ 相位共轭的, 但是其调整困难, 且转换效率不高。布里渊加强四波混频<sup>[3]</sup>(BEFWM)是一种简并四波混频, 同样可以获得高的相位共轭保真度, 在小信号放大等方面有很多的应用<sup>[4]</sup>。

本文采用双频共轴抽运, 选择合适条件, 共轭光由布里渊增强四波混频诱导产生, 而能量的转换主要由SBS的放大实现, 因此, 该方案具有相位共轭高保真及高转换效率的优点。在SBS转换效率稳定度最佳时, 使用列阵相机测量激光束能量远场角分布, 对相干驱动SBS相位共轭保真度进行了实验研究。

收稿日期: 2002-03-01; 收到修改稿日期: 2002-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 60088001), 863 惯性约束聚变主题和国防科技重点实验室基金资助项目。

作者简介: 杨珺(1977—), 女, 哈尔滨工业大学博士研究生, 主要从事非线性光学方面的研究。E-mail: june1121@sohu.com

## 2 共轭光产生机理分析

在 SBS 池中引入频差为介质声子频率的双频共轴抽运光  $E_s(\nu_0)$  和  $E_1(\nu_0 - \Delta\nu_s)$ , 脉冲  $E_1$  较  $E_s$  有一适当的时间延迟。分两种情况讨论: 1) 当  $E_s$  较弱时, 经透镜聚焦后, 在池中不能达到 SBS 阈值。此时两光束相干涉, 在介质中形成拍频相干光场, 此干涉将由电致伸缩驱动声子波。如忽略温度效应, 声子波的运动方程为<sup>[5]</sup>

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

$j = s, 1, 2, c$

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 ( $\eta$  为粘滞系数,  $T$  为弹性系数,  $\gamma$  为电致伸缩系数,  $\rho$  为密度,  $U$  为偏离平衡位置的位移)。将激光、散射光均作平面波近似, 可以将 (1) 式化为

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

这里  $T/\rho = v_s^2$ ,  $\eta/\rho v_s = \alpha_s$ ,  $A_s = E_s E_2^*$ ,  $A_1 = E_1 E_c^*$ ,  $\omega_{sj} = K_{sj} v_s$ 。其中,  $v_s$  为声子速度,  $\alpha_s$  为声子衰减长度,  $\omega_{sj}$  为波矢  $K_{sj}$  的声子频率。由于  $\Delta\omega$  为抽运光与 SBS 散射光的频差, 所以  $\Delta\omega \approx \omega_{sj}$ , 这样干涉条纹将以近于声子速度传播, 从而在干涉区激发起 PC 声子模, 抑制噪声及其他非线性效应的竞争, 可望在大区域内产生稳定的 SBS 相位共轭保真度。2) 当  $E_s$  较强时, 经过透镜聚焦后在池中首先产生 SBS, 形成脉冲  $E_2(\nu_0 - \Delta\nu_s)$ 。此时, 当脉冲  $E_1$  到达时, 便可以形成很好的简并四波混频, 产生的共轭光  $E_c(\nu_0 - 2\Delta\nu_s)$  正好是  $E_1$  的 SBS 共轭光。在聚焦区域, 由于 SBS 放大的增益很高, 因此,  $E_1$  的能量大部分可以转移到  $E_c$  中去, 从而实现高转换效率。同时, 共轭光由于是布里渊增强四波混频诱导产生的, 理论上相位共轭可达到近 100% 保真。

## 3 实验光路

本实验采用双频单池方案, 实验光路如图 1。

虚线框为单纵模染料调 Q Nd:YAG 振荡器。由染料片调 Q, 抽运激光的脉宽与调 Q 染料片的浓度有关, 选择不同透过率的调 Q 染料片, 可以获得不同脉宽的抽运光。一般来说, 调 Q 染料片的透过率越高, 抽运光脉宽越宽。凹凸透镜组合实现激光扩束。

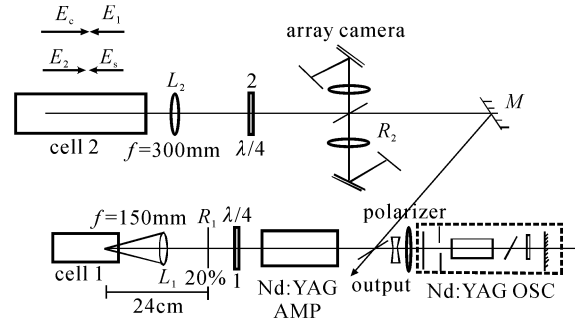


图 1 相位共轭保真度实验装置  
Fig. 1 Schematic diagram of the experiment setup measuring for PC fidelity

Nd:YAG 放大级的输出能量取决于放大级 Xe 灯所加的放电电压, 调节 Xe 灯的放电电压, 就可以改变抽运激光的能量。Nd:YAG 激光器输出光滑脉冲激光, 脉宽 8~9 ns, 其相应频率记为  $\nu_0$ , 振荡级与放大级 Xe 灯的放电重复频率为 1 Hz。池 1 与池 2 的介质都为  $\text{CCl}_4$ , 其声子寿命为 0.6 ns。池 1 长度为 30 cm, 前面的聚焦透镜焦距为 15 cm, 其焦点与反射镜  $R_1$  间距为 24 cm; 池 2 长度为 80 cm, 前面的聚焦透镜焦距为 30 cm。反射镜  $R_1$  作为垂直分束片将入射光分成两束, 反射光作为信号光  $E_s$ , 透射光经池 1 产生后向受激布里渊散射, 脉宽被压缩变成陡前沿, 频率变为  $\nu_0 - \Delta\nu_s$  ( $\Delta\nu_s$  为 Brillouin 频移), 将其作为抽运光  $E_1$ , 两束光再次经四分之一波片 1 变成 s 偏振光, 由偏振片侧向输出。 $E_1$  与  $E_s$  合并侧向提取后经透镜 2 聚焦入射到池 2。在池 2 中,  $E_1$  较  $E_s$  脉冲峰值间具有时间延迟, 先入射的  $E_s$  自己先产生后向 SBS 光  $E_2(\nu_0 - \Delta\nu_s)$ , 当  $E_1$  脉冲到达时,  $E_s$ ,  $E_1$ ,  $E_2$  三波发生 BEFWM, 产生共轭光  $E_c(\nu_0 - 2\Delta\nu_s)$ , BEFWM 产生的共轭光  $E_c$  具有高保真特性。对 SBS 来说,  $E_c$  也正好是  $E_1$  的共轭光, 因而当  $E_1$  足够强时, 能够放大  $E_c$ , 从而可以获得较高的转换效率。反射共轭光  $E_c$  经四分之一波片 2 后, 呈 p 偏振, 从而透过偏振片, 获得输出提取。反射镜  $R_2$  作为分束镜, 输入与输出能量由反射镜  $R_2$  取样, 以供阵列相机测量。选用紫外示波纸记录激光阵列点, 在平均发散角 (70%) 范围内, 激光能量比率的测量误差在 5% 以内, 因而其测量精度与套孔法用能量计直接测量的精度相近<sup>[6]</sup>。由于阵列相机能反映光束更多的信息, 能够获得不同发散角内的能量比率, 因此可以得到不同能量比率标准下的相位共轭保真度。

由于池 1 和池 2 为同一种介质,所以入射到池 2 中的两波之间的频差恰为布里渊频移,该两波在放大池中相互作用能够驱动声子场,这种被驱动的声子波比在噪声中形成的声子波具有更快的响应时间和更好的相位共轭声子模,从而抑制了噪声及其他非线性效应的竞争。声波将抽运光能量转移到共轭光中去,引起共轭光的指数放大。被放大的信号光与入射抽运光在同一波面上具有相位共轭关系。

## 4 实验结果

相位共轭保真度是通过列阵相机测量激光光束能量远场角分布而获得的。对于所测输入输出激光的能量远场角分布,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。实验在 SBS 转换效率稳定性最佳状态下进行,即在  $E_1 : E_s = 1.6 : 1$ , 抽运光能量 (59.2 mJ) 在饱和区内,平均转换效率 40.8%,其相对起伏  $\sim 2\%$ 。

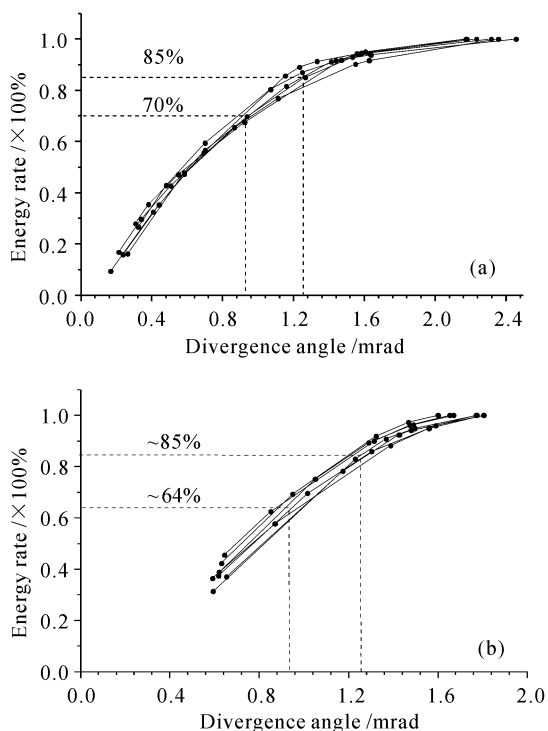


图 2 双频抽运光(a)及其共轭光(b)的能量角分布  
 $E_1 : E_s = 1.6 : 1$ , 总抽运能量 59.2 mJ, 转换效率  $\sim 40.8\%$   
 Fig. 2 Energy rate of double-frequency pumping light (a) and the conjugation light (b) vs divergence angle  
 $E_1 : E_s = 1.6 : 1$ , total pump energy is 59.2 mJ, conversion efficiency  $\sim 40.8\%$

图 2 为测得的人射光能量比率随发散角变化情况。如果用类似套孔法的方法来衡量相位共轭保真度,对选取不同的透过率,测得的保真度结果会有所不同。我们选取  $T_1 = 85\%$  和  $T_2 = 70\%$  这两个标准,在图 2(a)中,标出了与这两个透过率相对应的发散角,以此发散角在图 2(b)中读取对应的透过率分别为  $T_1' \sim 85\%$ ,  $T_2' \sim 64\%$ ,这样相应的保真度分别为  $\sim 100\%$  和  $\sim 91\%$ ,比一般文献报道的受激布里渊散射的保真度要高,符合了我们上面的分析。尤其是在以  $T = 85\%$  作为标准时,保真度几乎为百分之百,因此这种共轭光产生方案非常适合于精密激光工程中,它能够几乎百分之百地补偿光路中的相位畸变。此外从图 2(b)中可以看到,共轭光还具有较高的相位共轭保真度稳定性,其相对起伏  $< 5\%$ 。

## 5 结 论

双频共轴抽运的共轭镜方案能够产生近 100% 相位共轭的共轭光,比起普通的单池共轭镜结构,共轭光保真度有明显的改善。实验发现,当信号光与抽运光的能量接近时,FWM 效应得到增强,更容易产生完全相位共轭的共轭光。

实验结果证实了本文的最初设想,该方案可望用于强激光系统中,以改善高功率激光器的光束质量。

### 参 考 文 献

- 1 N. F. Andreyev, E. A. Khazanov, O. V. Palashov *et al.*. Phase-conjugation fidelity fluctuations for various stimulated-Brillouin-scattering mirror geometries [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(5):786~788
- 2 M. S. Mangir, D. A. Rockwell. 4.5-J Brillouin phase-conjugate mirror producing excellent near-and far-field fidelity [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(8):1396~1400
- 3 N. G. Basov, I. Zubarev. Powerful laser systems with phase conjugation by SMBS mirror [J]. *Appl. Phys.*, 1979, **20**(3):261~264
- 4 B. I. Choi, C. H. Nam. Temporal characteristics of polarization-decouple, anti-Stokes-type Brillouin-enhanced four-wave mixing [J]. *Appl. Phys. B*, 1999, **69**(1):55~60
- 5 A. M. Scott, M. S. Hazell. High-efficiency scattering in transient Brillouin-enhanced four-wave mixing [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1986, **QE-22**(8):1248~1257
- 6 He Weiming, Lu Zhiwei, Wang Qi. Ultraviolet-oscilloscope paper used in array camera to record the far-field of laser beam [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1997, **17**(6):831~832 (in Chinese)