

单池单焦点及单池双焦点相位共轭度研究

杨爱玲* 李明中 哈元清 杨经国* *

(四川大学物理系 成都 610064)

丁磊 张小明 满永在

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所 成都 610003)

提要 报道了单池单焦点及单池双焦点两种情况下的受激布里渊散射相位共轭度。结果表明:单池单焦点时相位共轭度随入射能量的升高而略有下降;单池双焦点时相位共轭度敏感地依赖于两焦点的距离。当两焦点距离很近时,相位共轭度与单池单焦点比较基本不变;当两焦点相距较远时,相位共轭度得到提高,最大增加量可达 13%。对此作者给予解释,实验结果验证这种解释是合理的。

关键词 单池单焦点,单池双焦点,受激布里渊散射,相位共轭度

相位共轭是受激布里渊散射(SBS)的一个基本特征,相位共轭度反映了散射光与入射光的相位相关程度。关于 SBS 相位共轭已有大量报道^[1~6]。Zel'dovich 曾预言,随泵浦能量升高,SBS 相位共轭度会提高^[7],然而许多实验表明,高于阈值能量 4 倍以上时,SBS 相位共轭度存在严重的涨落,总体表现下降的趋势^[3,6]。也有文章结果表明高能量泵浦时,SBS 相位共轭度趋于饱和^[7]。如文献[7]认为,SBS 相位共轭度与脉冲前沿上升时间密切相关,脉冲上升时间与超声场弛豫时间相接近时,SBS 相位共轭度存在涨落;当脉冲前沿宽度大于介质弛豫时间时,SBS 相位共轭度趋于饱和。目前关于 SBS 相位共轭度依旧是一个热门的话题。人们从各种可能的角度分析 SBS 相位共轭度涨落的原因并寻求改善 SBS 相位共轭度的途径^[6,8,9],因为这关系到 SBS 的实用化问题。在实践中寻求合适的介质并得到高能量高稳定度的 SBS 输出,可以改善高功率固体激光器的光束质量,减少光学元件的造价^[10]。

文献[2]报道了用双池双焦点使 SBS 相位共轭度提高了 7%。作者认为一个焦点的不足可以被另一个焦点补偿,但是 SBS 有一个响应时间,如果两焦点相距很近甚至重合,在 ns 时间(即介质弛豫时间)内,第二焦点处的相关声子应是较少的,因此相位共轭度应与两焦点的距离有关。基于此我们研究了单池单焦点及单池双焦点的相位共轭度与泵浦能量的关系,实验结果证明了我们的猜想。

1 SBS 相位共轭度概念及微孔法测量 SBS 相位共轭度原理

引起受激散射的介质的光学特性可由入射光激发而改变。Stokes 光来自 SBS 过程中与泵浦波传播方向相反的自发噪声的指数放大,并且向着含有 SBS 激活介质的窗口传播。频率为

* 现在工作地址:青岛海洋大学物理系。

* * 通信联系人。

收稿日期:1998-01-04;收到修改稿日期:1999-04-10

ω 的入射激光被由于折射率的变化而造成的频率为 Ω 的超声场散射, 散射光的频率下降到 Stokes 频率 ($\omega = \omega_s - \Omega$), 这种相互作用导致激光与 Stokes 光的干涉, 并包含了一个不同的频率分量 $\omega_s - \omega$, $\omega_s - \omega$ 与声波的频率相同。物质系统对这一干涉项的响应可作为一种增强声波振动的源, 激光与声波的相互作用增强了 Stokes 光, 激光与 Stokes 波的相互作用又加强声波。在合适的条件下, 两种相互作用的正反馈导致 Stokes 光的指数放大^[11]。SBS 的物理机制在于共轭波相对于非共轭波的分放大过程^[7] (discrimination mechanism)。实现 SBS 要求满足条件 $gIL \geq 30$, g 为介质的 SBS 增益因子, I 为入射光的强度, L 为相互作用长度^[7]。

设入射光为单色平面波, $E_L(\vec{r}, t) = E_L(\vec{r})\exp(-i\omega t)$, 共轭波为 $E_c(\vec{r}, t) = A E_L^*(\vec{r})\exp(-i\omega t) = E_s(\vec{r})\exp(-i\omega t)$, E_c 为 E_L 的空间反演, A 为振幅反射系数。1977 年, Zel'dovich 用入射场 $E_L(\vec{r})$, 散射场 $E_s(\vec{r})$ 给出相位共轭度的数学表示^[7], 它由相关函数

$$F = \frac{\left| \int E_L(\vec{r}) E_s(\vec{r}) d^2\vec{r} \right|^2}{\int |E_L(\vec{r})|^2 d^2\vec{r} \cdot \int |E_s(\vec{r})|^2 d^2\vec{r}} \quad (1)$$

描述。当散射光精确地反转入射波前时, $F = 1$, 表示理想的相位共轭。与入射波前相比较, 散射波的任何波前畸变都会导致相位共轭度的下降。

透镜具有相位变换的功能, 即改变波面形状的作用^[12]。波面的形状取决于光场中相位值相同的点的轨迹。因此, 改变波面的形状就会改变光场的复振幅分布。由于测量复振幅分布很困难, 可以利用透镜的相位变换特性来间接地测量 SBS 的相位共轭度。若 ϵ_L, ϵ_s 为入射激光与散射光的能量, $\epsilon_L(\theta), \epsilon_s(\theta)$ 表示衍射极限时入射光及散射光的爱里斑的能量, 如果散射波精确地再现入射波前, 即散射波与入射波的复振幅相关程度好, 那么 $\epsilon_s(\theta)/\epsilon_L(\theta)$ 与 ϵ_s/ϵ_L 相一致。散射波前相对于入射波前的任何畸变, 将导致 $\epsilon_s(\theta)/\epsilon_L(\theta)$ 的减小, 从而 F 下降。因此, F 可以写为

$$F = [\epsilon_s(\theta)/\epsilon_L(\theta)] / (\epsilon_s/\epsilon_L) \quad (2)$$

圆孔衍射的爱里斑的能量占总能量的 83.8%^[12], 斑的半径 $R = 1.22\lambda f/a$ 。我们可以据此选择孔的大小使其直径等于 $2R$, 使透过孔的能量为总能量的 83.8%。在实际测量中, 可先以入射激光标定此孔, 然后对 $\epsilon_s(\theta)/\epsilon_L(\theta)$ 进行测量, 按公式(2)即可求出 SBS 的相位共轭度。

2 实验及结果

2.1 实验装置

图 1 是实验装置图。图中 OS 为单纵模 Nd·YAG 环形激光器, 用 LiF₂ 调 Q, 用两个标准具选模, 输出能量为 1.0 mJ, 光斑大小约为 1.0 mm。光束经偏振片 P_1 后成为线偏振光。 R_1 是 45°转子, FR 是 45°法拉第隔离器, 用以阻隔由于偏振态畸变未能补偿的背散射光。 L_1 与 L_2 组成一个望远扩束系统, 以扩大光束的截面, 增加放大器的填充因子, 以有效地提取放大器的储能。偏振片 P_2 的偏振方向与 P_1 垂直, 光束经一级放大器 A_1 后, 光斑的直径为 6.0 mm。 F 为真空空间滤波器。 L_3, L_4 等焦距, L_3, F 及 L_4 构成一个空间像传输系统, 以减小衍射效应, 优化光束在不同孔径间的耦合系数。为防止空气击穿, F 抽真空。 R_2 是一个 90°的自然旋光晶体, 用以减小两级放大器的应力双折射。光束经二级放大器 A_2 后, $\lambda/4$ 波片将线偏振光变为圆偏振光。入射光经 SBS 池反射后再次被 A_2, A_1 放大, 经偏振片 P_2 输出。 M_1, M_2, M_3 是 1064 nm 平面全反射镜。 W 是未镀膜的玻璃劈板。 D_1, D_2, D_3 及 D_4 是数字式能量计。BS 是反射率为 80% 的分束镜。 L_6 的焦距为 200.0 cm。pin 是一个直径为 0.960 mm 的微孔。

实验中 SBS 池长 $L = 150.0$ cm, L_5 焦距为 92.0 cm, 它被密封在池中。SBS 池的安排有两种结构。一种为单焦点, 一种为双焦点。第二焦点由池后的球面全反射镜 SR 形成, 球面全反

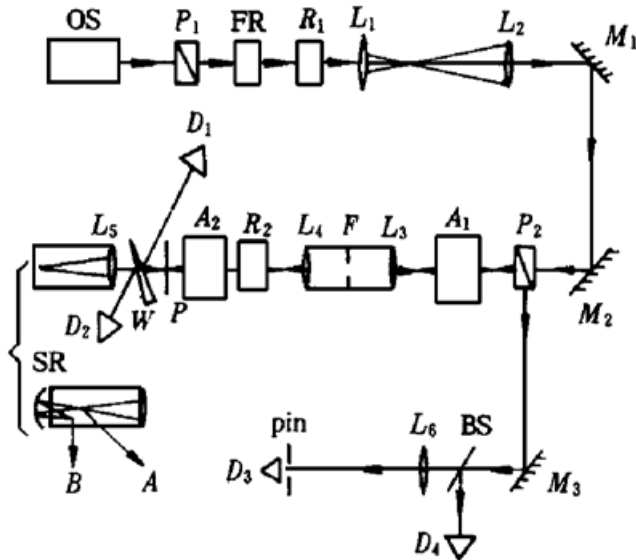


图 1 同时测量 SBS 反射率与相位共轭度的实验装置图

Fig. 1 Schematic of the experimental arrangement for simultaneously measuring SBS reflectivity and far-field fidelity

OS: single longitudinal-mode Nd:YAG ring laser; P_1 , P_2 : polarizers; R_1 : 45° rotator; FR: Faraday isolator; $L_1 \sim L_6$: convex lenses; $M_1 \sim M_3$: full reflecting mirrors; A_1 , A_2 : Nd:YAG amplifiers; F : vacuum filter; P_3 : $\lambda/4$ polarizer; R_2 : 90° rotator; W : uncoated glass wedge; BS: beam splitter; $D_1 \sim D_4$: numerical energy detectors; pin: pinhole; SR: spherical full reflecting mirror

射镜的焦距为 25.0 cm。

2.2 微孔的校准

应用微孔法测量 SBS 相位共轭度, 微孔的校准是非常重要的。微孔的大小用图 2 所示的光路图来校正。校正光为入射激光。微孔放在 L_6 的焦点上, 调整孔的大小, 使通过孔的能量与没有孔时的能量之比为 80%, 此时微孔的直径为 0.960 mm, 相应于 1.07 倍衍射极限。固定微孔不动, 以图 1 所示的光路来测量 SBS 的相位共轭度。根据(2)式, 有

$$F = D_3 / (D_4 \cdot 0.8) \quad (3)$$

(3) 式中, D_3 , D_4 能量都已归一化。

实验中使用的介质为分析纯 CCl_4 , 折射率 $n = 1.4591$, Brillouin 频移 $\Omega/2\pi = 4390 \text{ MHz}$, 线宽 $\Gamma/2\pi = 520 \text{ MHz}$ ^[11]。

2.3 单焦点及双焦点相位共轭度测量

单焦点情况下, F 随入射能量 E_i 的变化如图 3(b) 的圆点所示。 E_i 增加时, F 略有下降。

双焦点时, 实验结果表明 F 与球面镜距池后端面的距离有关, 即与二焦点的距离大小有关。若以焦点为坐标原点, Stokes 波传播方向为坐标轴正向, 两焦点相距不同距离时, F 随入射能量的变化见图 3(c) 中的三角形。按光程计算图(a)中, 两焦点相距约 12.60 cm; 图(b)中为 7.20 cm; 图(c)为 2.97 cm; 图(d)为 -1.41 cm; 图(e)为 -8.70 cm。由 5 图可知, 当两焦点相距较远时, SBS 相位共轭度提高了; 而两焦点相距较近时, 相位共轭度基本无变化。

以上结果可通过下面的分析解释。单池双焦点结构相当于双池结构, 如图 4 所示。激光通过第一焦点 A, 由于 SBS 反射率较低(实测结果小于 43%), 透射的激光能量被再次聚焦到池中, 在此点(即第二焦点 B)激光达到 SBS 阈值^[7]即发生二次 SBS。当两焦点相距较远时, B 点相对于 A 点来说是较低能量激光激发的 SBS, 因此相位共轭度较高^[3,5]。光束经 A 到 B 所需的时间大约为 2 ns, 而入射光的时间半宽度为 20 ns。因此 B 点的 Stokes 光相对于池中的入射激光脉冲来说是一个好的种子光源, 在池中被放大后相位共轭度较高^[6]。

当两焦点相距较近时, 由于两焦点发生 SBS 的时间间隔为 2 ns, 声子的寿命也为 ns 量

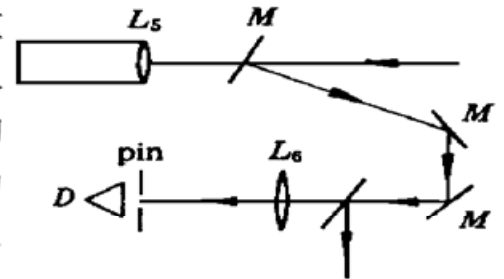


图 2 微孔校准装置图

L_5 , L_6 : 凸透镜; M : 全反射镜;

pin: 微孔; D : 数字能量计

Fig. 2 Schematic of the experimental arrangement for calibrating pinhole
 L_5 , L_6 : convex lenses; M : full reflecting mirror; pin: pinhole; D : numerical energy detector

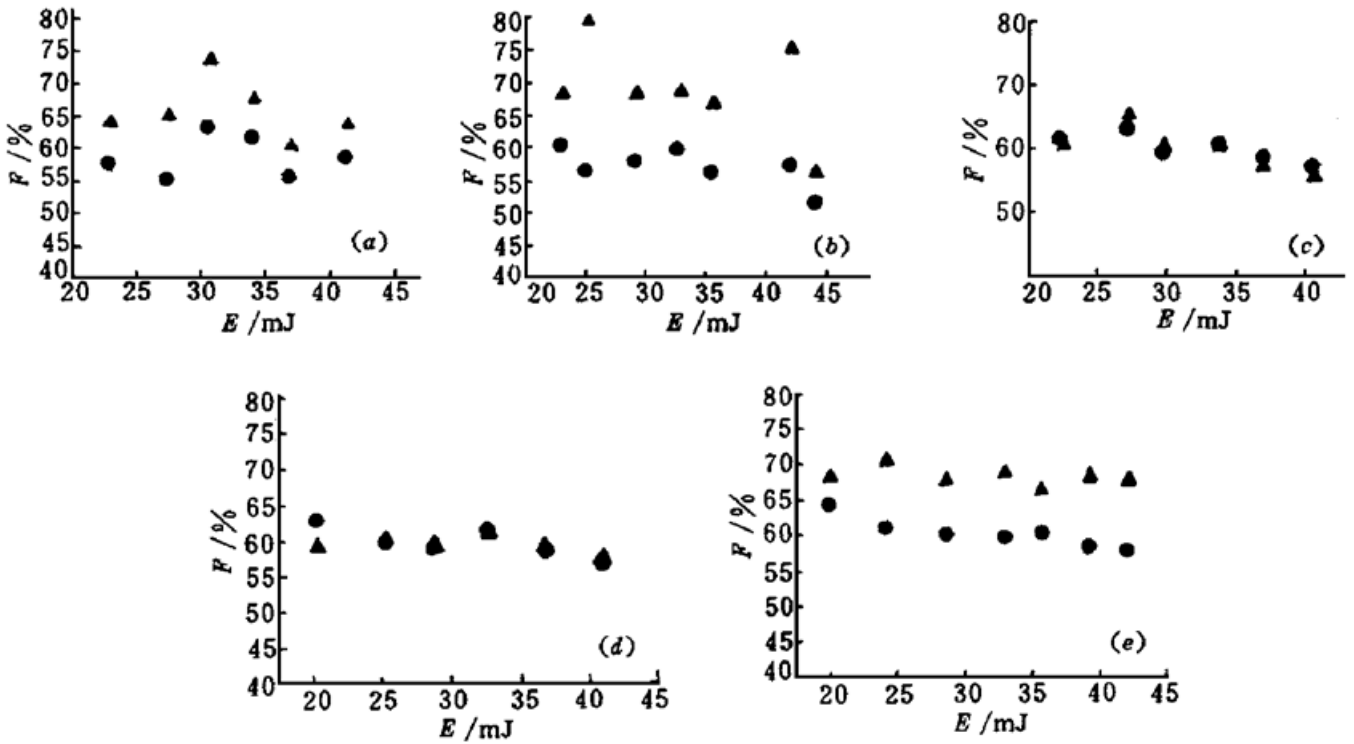


图3 单焦点及双焦点相位共轭度比较

圆点为单焦点相位共轭度;三角点为双焦点相位共轭度

Fig. 3 The comparison of phase conjugation fidelity in the cases of one focus and of two foci

Circle point is the fidelity of one focus and triangular point is that of two foci

The lightpath of the two foci is about (a) 12.60cm; (b) 7.20 cm; (c) 2.97 cm; (d) - 1.41 cm; and (e) - 8.70 cm

级。A 点发生 SBS 后, 在 2 ns 时间间隔内, 周围的声子还没有恢复原状, 因此 B 点激发的相关声子少, 与入射波共轭的 Stokes 光较非共轭的 Stokes 少, 即 B 点的 SBS 相位共轭度差, 所以尽管 SBS 反射率提高 (实测提高 23~ 34%), 但相位共轭度基本不变。

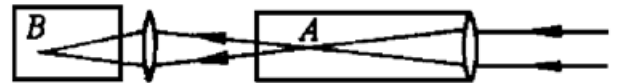


图4 双池双焦点 SBS

点 A 和点 B 相应于图 1 中的点 A 与点 B

Fig. 4 SBS of two foci in two cells

为确定池中是否发生二次 SBS, 我们用时间分辨 Points A and B correspond to points A and B in Fig. 1 为 500 ps 的 TEKTRONIX6400 数字示波器测量了 SBS 的时间波形, 如图 5 所示。(a) 表示单焦点的时间谱, (b) 表示双焦点的时间谱。(b) 中两个脉冲为二次 SBS 的结果, 两脉冲的时间间隔约 4 ns, 这与前面的分析相一致。由于以上原因, 双焦点相位共轭度比单焦点高。

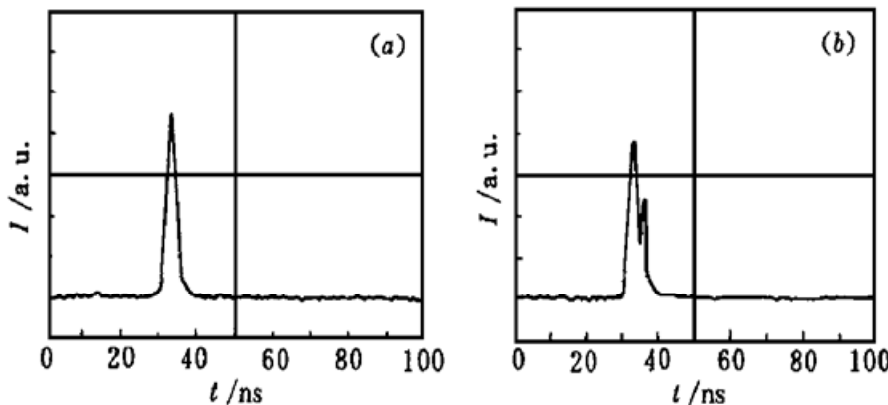


图5 被压缩了的 Stokes 光

(a) 单焦点情形; (b) 双焦点情形, 两种情形下泵浦能量相同

Fig. 5 The pulsed Stokes

(a) is in the case of one focus, (b) is in the case of two foci. The pump energy is the same in the two cases

3 结论与讨论

1) 实验结果表明, 单焦点时随入射泵浦能量的增加 SBS 相位共轭度略有下降。双焦点时, 相位共轭度与两焦点的距离有关, 当两焦点距离较近时, 相位共轭度基本不变; 当两焦点相距较远时, SBS 相位共轭度提高。由图 3 (b), 最大增加量为 13%。双焦点时出射能量增加及双峰时间谱证明上述分析是合理的。

2) 受激散射中, 在介质中建立的微扰的振幅与积累时间成正比, 即反比于弛豫常数 Γ , 结果所有的受激散射有一个共同的特性, 即增益 $G \propto \Gamma^{-1}$ 。也就是说, 在受激散射中, 弛豫的时间越长, 受激散射越强^[7]。CCl₄ 的弛豫时间较短, 大约为 1 ns, 因此 SBS 反射率较低。

3) 散射波相对于入射波理想相位共轭时 $F = 1$, 实测相位共轭度约为 60% 左右。实测值与理想值的偏离, 一方面反映了散射波未能精确再现入射波, 另一方面, 远场微孔法测量 SBS 相位共轭度虽然可以使实验结果得到简单的解释, 然而有其自身的缺点, 不免给实验带来误差。恰好在共轭光束横截面内放置一个相对小的微孔是一个缺点。按一倍衍射角所取孔较小, 因而对于入射光波传播方向不敏感, 这就会减小测量精度, 也就是说实测相位共轭度偏小。另外, 强光入射微孔时, 可能发生等离子体堵口效应。因此, SBS 光较强时, 在微孔前要加衰减片。

Zel'dovich 等应用契形镜技术来测量相位共轭度^[7]。这一方法是比较泵浦激光与散射波能量及泵浦辐射和散射波在远场的亮度。在实验中如果应用同样的感光物质, 光物质特性的变化和进行条件不影响实验的精度。而且这种实验构想自动地提供感光物质黑度曲线。这种方法比微孔法精度高, 但测量过程稍复杂, 详见参考文献[7]。

4) 相位共轭度与波前位错(dislocation)有关^[7]。从平均角度讲, 正的位错与负的位错是相等的。当波前传播的时候, 可能导致一对符号相反的位错。相反的过程, 即一对符号相反的位错的抵消是可能的。对于 SBS, 如果波前的位错不能完全抵消, 那么相位共轭度会下降。

5) 实验结果表明, SBS 脉冲压缩中存在相位跃变(图 6)。文献[13, 14]也给出相似的结果。根据文献[13], 相位跃变是 Stokes 光相位的突然转变, 同时伴随着 Stokes 光强的急剧变化(Stokes 光中部的分裂), 是 Stokes 光种子噪声源的宏观结果。它干扰了 Stokes 光的相位, 减小了相干长度, 增加了光谱宽度。相位跃变的产生中断了 SBS 的相位共轭过程, 造成 SBS 相位共轭度下降。

6) 文献[8]表明介质的纯净度严重地影响 SBS 的相位共轭度。纯化 SBS 介质, 可能提高 SBS 相位共轭度。

致谢 本文作者十分感谢梁樾、袁小东、袁静、陈远斌、淳于咏梅、唐灿、王朝章、郑万国、朱启华、蒋小东、叶玲、景峰、张建波等同志的帮助。

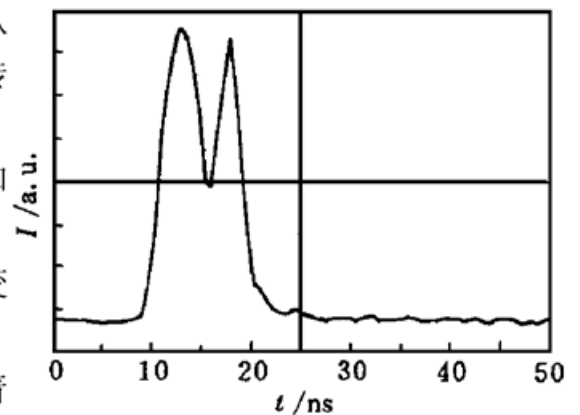


图 6 脉冲压缩过程中的相位跃变

Fig. 6 Phase jump in the pulse compression of SBS

参 考 文 献

- 1 Min. Sik Jo, Byoung II Choi, Chang Hee Nam *et al.*. Temporal characteristic of phase conjugation fidelity in SBS. *Opt. Quantum Electron.*, 1995, **27**: 405~ 410
- 2 N. F. Andreyev, E. A. Khazanov, O. V. Palashov *et al.*. Phase-conjugation fidelity fluctuations for various stimulated-Brillouin-scattering mirror geometries. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1994, **11**(5): 786~ 788
- 3 John. J. Ottusch, David A. Rockwell. Stimulated Brillouin scattering phase-conjugation fidelity fluctuations. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(6): 369~ 371
- 4 Metin S. Mangir, David A. Rockwell. 4. 5-J Brillouin phase-conjugation mirror producing excellent near-and far-field fidelity. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1993, **10**(8): 1396~ 1400
- 5 C. Brent Dane, William A. Neuman, Lloyd A. Hackel. Pulse-shape dependent of stimulated-Brillouin-scattering phase-conjugation fidelity for high input energies. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(18): 1271~ 1273
- 6 G. J. Crofts, M. J. Damzen. Experimental and theoretical investigation of two-cell SBS systems. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1991, **8**(11): 2282~ 2288
- 7 Fisher Robert A.. *Optical Phase Conjugation*. New York: Academic Press, 1983. 140
- 8 Nikolay Andreev, Oleg Kulagin, Oleg Palashov *et al.*. SBS of repetively pulsed radiation and possibility of increasing of the pump average power. *SPIE*, 1995, **2633**: 476~ 493
- 9 V. E. Yashin. Problems of SBS phase conjugation in large scale fusion laser facilities. *SPIE*, 1995, **2633**: 412~ 421
- 10 Hans J. Eichler, Andress Hanse, Baining Liu *et al.*. Phase conjugation for realizing lasers with diffraction-limited beam quality and high average power. *SPIE*, 1996, **2771**: 13~ 21
- 11 Robert A. Boyd. *Nonlinear Optics*. Boston: Academic, 1990. 325~ 326
- 12 Q. J. Yao. *Optic Course*. First Edition. Beijing: People's Education Publishing House, 1981. 112 (in Chinese)
- 13 M. S. Mangir, John J. Ottusch, D. C. Jones *et al.*. Time-resolved measurements of stimulated-Brillouin-scattering phase jumps. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(11): 1702~ 1706
- 14 M. D. Skeldon, A. Okishev, A. Babushkin. Transient SBS pulse compression for photoconductive switch activation. *SPIE*, 1995, **2633**: 422~ 428

Investigation of the Fidelity of Phase Conjugation of Single-cell with One Focus and Single-cell with Two Focuses

Yang Ailing Li Mingzhong Ha Yuanqin Yang Jingguo

(*Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064*)

Ding Lei Zhang Xiaoming Man Yongzai

(*Nuclear Physics and Chemistry Insitute, Chinese Academy of Engineering Physics, Chengdu 610003*)

Abstract This paper reports on the fidelity of Stimulated Brillouin Scattering of single-cell with one focus (SCOF) and single-cell with two focuses (SCTF). The results showed that in the case of SCOF the fidelity of SBS decreased slightly with the pump energy increasing, but for the SCTF, the fidelity is sensitive to the length of the two focuses. When the length is short, the fidelity is almost unchanged, however, when the length is long, the fidelity increased and the biggest enhancement is up to 13%. An explanation to this phenomenon is given. The experimental results support this interpretation.

Key words single-cell with one focus, single-cell with two focuses, SBS, fidelity of phase conjugation