

受激布里渊散射中的相位跃变

杨爱玲¹ 杨经国² 丁磊³ 李明中³ 张小民³ 满永在³

¹ 青岛海洋大学物理系 青岛 266003; ² 四川大学物理系 成都 610064;
³ 中国工程物理研究院核物理与化学研究所 成都 610003

摘要 报道了受激布里渊散射(SBS)过程中的相位跃变,实测了相位跃变的几率随入射脉冲能量的关系。结果表明,在 CCl_4 介质中,相位跃变的几率约为20%。即使在饱和能量下,SBS的相位跃变依然存在。相位跃变干扰了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的相位共轭度下降。

关键词 受激布里渊散射,相位共轭度,相位跃变

中图分类号 O 437.2 **文献标识码** A

Phase Jump in the Process of Stimulated Brillouin Scattering

YANG Ai-ling¹ YANG Jing-guo² DING Lei³
LI Ming-zhong³ ZHANG Xiao-ming³ MAN Yong-zai³

¹ Department of Physics, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003

² Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064

³ Nuclear and Physical Institute, Chinese Engineering Academy, Chengdu 610003

Abstract This paper reported phase jumps in the process of Stimulated Brillouin Scattering. The jumped probability with the incident energy was measured. The result showed that the jumped probability in the medium CCl_4 is about 20%. Even if the incident energy is saturated, phase jumps still exist. Phase jumps disrupt the phase of the Stokes beam generated by SBS, therefore tend to decrease the coherence length, increase the spectral width of the Stokes signal, suspend the phase conjugation process and decrease the fidelity of phase conjugation.

Key words Stimulated Brillouin Scattering (SBS), fidelity of phase conjugation, phase jumps

1 引言

本质上受激布里渊散射(SBS)与激光的产生相类似,都是由自发噪声场的指数放大形成的。SBS中的Stokes光来自SBS过程中与抽运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^[1]。自发散射光是一个噪声场,其强度与相位的涨落是由自发散射光的线宽决定的,理论表明自发散射相位的涨落在放大过程中会被极大地延迟并且获得一个相移^[2]。如受激散射已达到饱和,散射光强度涨落几乎被完全抑制,但相位的涨落依然存在。

与相位跃变相联系的强度涨落首先在超荧光发

射中被观测到^[3]。文献[3]称这种波为“相位波”。文献[4,5]报道了受激拉曼散射过程中的相位跃变,作者将相位跃变后的波称为“孤子”。在SBS过程中,关于SBS的相位跃变的最先报道是1978年,前苏联的两个科研小组^[2,6]通过从两个分立的、完全相同的SBS池中出射的Stokes光的干涉信号振幅的变化推测出SBS过程中存在相位跃变。1992年,Metin S. Mangir等^[7]用外差拍频法直接测量了SBS过程中的相位跃变。事实上,正如Metin S. Mangir所说,认识到噪声种子不仅仅驱使并且支持SBS过程进行下去是非常重要的。在理论处理上,很多作者从动态方程中忽略了描述受激散射过程的噪声项。然而,数学模拟表明^[5]如果噪声种子在SBS过程中建立而由于某种原因噪声消失,则SBS过程将会终止。

我们在研究 SBS 相位共轭及脉冲压缩过程中观测到相位跃变。

2 实验结果

采用文献[8]中的实验装置进行实验。实验中 SBS 介质为分析纯 CCl_4 , 其响应时间约为 1 ns, 阈值约为 3 mJ。 CCl_4 SBS 反射率较低, 约为 40%, 但脉冲压缩率较高。入射光脉宽 18 ns, 实验中观察到压缩得很好的脉宽为 2~3 ns 的 Stokes 光。这一结果接近极限压缩^[9]。在实验中, 同一输入能量下, Stokes 波脉冲宽度在不断变化, 但变化幅度较小。常常看到脉冲的头部在左右摆动。除了形状压缩得很好的脉冲外, 还观察到几种典型的“坏”脉冲, 即 SBS 过程中存在相位跃变, 如图 1 所示。这种脉冲为双峰结构, 两峰的高度在变化, 时间间隔约为 5~10 ns。实验中, 从振荡器输出的单纵模非常稳定, 两级放大器也较稳定, 即输入脉冲的脉宽及能量都较稳定。以上结果反应出 SBS 过程中的动态效应。

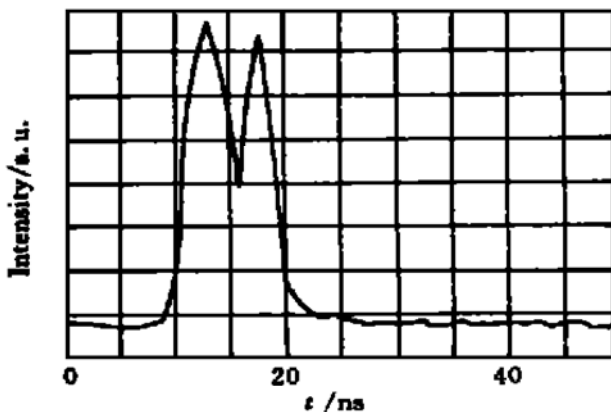


图 1 SBS 过程中的相位跃变

Fig.1 Phase jump in the process of SBS

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, 是 Stokes 光种子噪声源的宏观结果。由于声子的寿命小于抽运波的脉宽, 当原来的声子被耗尽时, Stokes 光的强度急剧下降, 随着新的声波的建立, 强度又快速增加。相位跃变干扰了 Stokes 光的相位, 减小了相干长度, 增加了光谱宽度^[10]。相位跃变的产生中断了 SBS 的相位共轭过程, 造成 SBS 的相位共轭度下降。

实验中测量了不同能量下相位跃变的几率, 如图 2 所示。图中每一个点代表同一抽运能量下 300 次的统计结果。用 CCl_4 作为 SBS 介质, 相位跃变的几率约为 20%。实验中, 抽运能量为 15 mJ 时,

Stokes 光输出达到饱和, 由图可知, 即使在饱和能量下, SBS 的相位跃变依然存在。这一点与理论结果相一致。

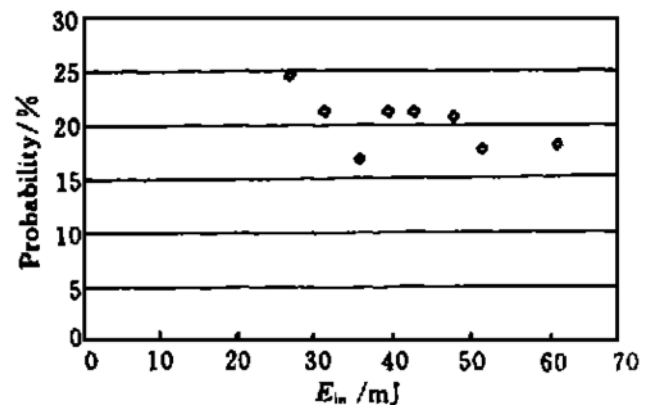


图 2 相位跃变的几率

Fig.2 Probability of phase jump with the intensity energy

3 讨论

1) 文献[6]分析了相位跃变的次数与噪声声子衰减时间的关系。最初的噪声声子涨落的相关时间为 $\tau_s \sim 1/\Gamma$, Γ 为散射波线宽; τ_s 与超声场的声子的衰减时间相一致。典型条件下, $\tau_s \sim 10^{-8} \sim 10^{-9}$ s。放大的散射波的涨落的相关时间涨落为 $\tau_{cor} \sim \Gamma^{-1} (2gL)^{1/2}$, $2gL \approx 30$ 。即 $\tau_{cor} \sim 5/\Gamma \sim 5\tau_s$ 。相应于这一相关时间, 与自发散射光相比, 受激散射线宽减少 5 倍。如果 Stokes 脉冲长度 T_s 超过 $\tau_{cor} \sim 5/\Gamma$, Stokes 波的复振幅可能经历 $N \sim T_s/\tau_{cor}$ 次涨落。

2) 关于受激散射中相位跃变的考虑对设计 SBS 或受激拉曼散射 (SRS) 发生器是很重要的。例如, 由于经由 SBS 的相位共轭简单高效, 故常将 SBS 发生器用在相位共轭激光振荡器或放大系统中^[11,12]。然而, 如果这样一个激光系统也要求窄带 (例如激光雷达系统), 那么选择 SBS 介质时必须考虑这样的事实: 当抽运脉冲的宽度是声子寿命的几十倍时, SBS 中的相位跃变很容易发生并且输出 Stokes 光的线宽增宽^[10]。当抽运源是一个脉宽为 10~50 ns 的调 Q 可见或近红外光源, 对于 CCl_4 或 TiO_4 , 由于声子寿命 $\tau < 2$ ns, 强度涨落很容易发生。但与相位跃变相联系的强度涨落很少在高压气体中发生, 因为高压气体中声子的寿命 $\tau \propto \rho\lambda^2$ (ρ 为气体密度, λ 为抽运波长), 改变密度, 可改变声子的寿命^[7]。

3) K. D. Ridley 与 A. M. Scott^[13] 应用 Brillouin

环形结构装置进行相位锁定来消除相位涨落,相位锁定的原理在于四波混频。但这方面的工作很少,有待于进一步研究。

4 结 论

实验中观察到 SBS 相位共轭过程中的相位跃变,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,是 Stokes 光种子噪声源的宏观结果。由于声子的寿命小于抽运波的脉宽,当原来的声子被耗尽时,Stokes 光的强度急剧下降,随着新的声波的建立,强度又快速增加。相位跃变干扰了 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 的相位共轭度下降。这给 SBS 的实用化带来了一定的困难,在实践中寻求合适的介质并得到高能量、高稳定度、窄脉宽的高光束质量的 SBS 输出具有重要意义^[1]。

参 考 文 献

- 1 Robert W. Boyd. Nonlinear Optics. Berlin: Academic press, 1992. 331 ~ 347
- 2 M. V. Vasil'ev, A. L. Gyulameryan, A. V. Mamaev *et al.*. Recording of phase fluctuations of stimulated scattered light. *JETP Lett.*, 1980, **31**(11): 634 ~ 638
- 3 F. A. Hopf. Phase-wave fluctuations in superfluorescence. *Phys. Rev. A.*, 1979, **20**(5): 2064 ~ 2073
- 4 Yasuhiro Akiyama, Katsumi Midorikawa, Minoru Obara *et al.*. Measurement of a π Stokes phase jump in spontaneously initiated stimulated Raman scattering. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1991, **8**(12): 2459 ~ 2465
- 5 D. C. Macpherson, R. C. Swanson, J. L. Carlsten. Quantum fluctuation and correlations in the stimulated Raman scattering spectrum. *Phys. Rev. A.*, 1989, **39**(7): 3487 ~ 3497
- 6 N. G. Basov, I. G. Zubarev, A. B. Mironov *et al.*. Phase fluctuations of the Stokes wave produced as a result of stimulated scattering of light. *JETP Lett.*, 1980, **31**(11): 645 ~ 649
- 7 Metin S. Mangir, John J. Ottusch, D. Crispin Jores *et al.*. Time-resolved measurement of stimulated-Brillouin-scattering phase jumps. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(11): 1702 ~ 1705
- 8 Yang Ailing, Li Mingzhong, Ha Yuanqing *et al.*. Investigation of the fidelity of phase conjugation of Single-cell with one focus and single-cell with two focuses. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(7): 613 ~ 618 (in Chinese)
- 9 David T. Hon. Pulse compression by stimulated Brillouin scattering. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(12): 516 ~ 518
- 10 John J. Ottusch, Metin S. Mangir, D. Crispin Jones *et al.*. Time-resolved measurement of stimulated-Brillouin scattering phase jump. *QELS' 93 Technical Digest*, 204 ~ 205
- 11 Chen Jun, Rong Yin, Zhou Yueming. Investigation on the Q-switch mechanism in the phase conjugate resonator with the SBS-cell. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1993, **20**(6): 421 ~ 425 (in Chinese)
- 12 H. J. Eicher. High power solid state lasers with SBS phase conjugation for application with high beam quality—High power lasers—Science and Engineering. Kluwer Academic, 1996. 241 ~ 253
- 13 K. D. Ridley, A. M. Scott. Phase-locked phase conjugation using a Brillouin loop scheme to eliminate phase fluctuations. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1996, **13**(5): 900 ~ 907