

文章编号: 1001-4322(2002)05-0713-04

介质参数对受激布里渊散射脉宽压缩的影响*

王 超¹, 吕志伟¹, 林殿阳¹, 王晓慧¹, 赵晓彦¹, 汤秀章², 张海峰², 单玉生²

(1. 哈尔滨工业大学 光电子技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘 要: 利用 KrF 激光和 SF₆ 介质从理论和实验上研究了声子寿命和增益系数等介质参数对 SBS 脉宽压缩比和能量反射率的影响。理论上采用一维瞬态模型对 SBS 过程进行数值模拟, 考虑了瞬态过程、介质吸收以及泵浦耗空的影响, 计算了 SBS 介质不同参数对脉冲压缩影响的规律。实验表明, 在实验参数的变化范围内声子寿命越短、增益系数越小, 越有利于脉宽压缩。在 0.68MPa 下, 脉宽压缩比达到 8。数值模拟了声子寿命和介质增益系数单独变化时对 SBS 过程影响的规律, 发现在声子寿命和增益系数同时变化时, SBS 对泵浦脉冲的压缩有最佳点。

关键词: 受激布里渊散射; 脉宽压缩; SBS 介质

中图分类号: O437.2 **文献标识码:** A

SBS 相位共轭镜可以压缩激光脉宽, 在许多应用领域中对脉冲时间方面要求比较严格, 如在光谱学中利用光泵研究介质材料的能级跃迁往往需要脉冲上升时间较短。而被压缩的 Stokes 光就具有上升时间短的特点。对于输出脉宽较窄的 SBS 光, 其峰值功率往往很高, 这对于某些实际应用及科研实验都是很有利的。窄脉冲高光束质量的光束, 可以用作惯性约束聚变中的光学探针^[1~4]。研究声子寿命与 Stokes 光脉宽压缩比的规律, 对选择合适的 SBS 介质, 从而获得高光束质量的短脉冲激光有重要的意义。本文从理论上采用一维瞬态模型对 SBS 过程进行数值模拟^[5,6], 通过数值模拟研究了介质的声子寿命、增益系数对 SBS 的脉宽压缩比的影响, 获得了声子寿命、增益系数对于 SBS 的脉宽压缩比的规律。

1 数值模型

采用一维瞬态理论模型对 SBS 过程进行数值模拟^[6], 这个模型包括瞬态影响, 介质的吸收以及泵浦耗空的影响。泵浦和 Stokes 场用 E_L 和 E_S 表示, Q 表示声波场。耦合波方程为

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \gamma\right) Q = -i g_1 E_L E_S^* \quad (1)$$

$$\left(\frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} + \frac{\gamma}{2}\right) E_S = -i g_2 E_L Q^* \quad (2)$$

$$\left(\frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} + \frac{\gamma}{2}\right) E_L = i g_2 E_S Q \quad (3)$$

式中: c 为光速; n 为介质折射率; γ 为自发辐射布里渊线宽 (FWHM), $\gamma = 1/2 \Gamma_B$, Γ_B 为介质声子寿命; g_1, g_2 为电场和声波场耦合系数; α 为吸收系数。将方程 (1) 式代入 (2) 和 (3), 并考虑截面的变化影响, 用 $E_L / A, E_S / A$ 代替 E_L, E_S , A 为截面积。则有

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) E_S = \frac{g}{2} E_L \int_0^t E_L^* E_S \exp[-\gamma(t-t')] dt' - \frac{1}{2} E_S \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} - \frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) E_L = \frac{g}{2} E_S \int_0^t E_L E_S^* \exp[-\gamma(t-t')] dt' + \frac{1}{2} E_L \quad (5)$$

式中: $g = 2 g_1 g_2 / \alpha$ 为增益系数。(4), (5) 式再加上边界条件: $E_S(z=0, t) = E_{S_0}(t), E_L(z=L, t) = E_{L_0}(t)$, 构成完整的数学模型。 $|E_{S_0}(t)|^2$ 为输入的 Stokes 噪声功率, $|E_{L_0}(t)|^2$ 为聚焦前的泵浦光功率。采用隐格式和后向差分, 对方程 (4), (5) 式进行离散化得

$$E_{S_{j+1}}^{m+1} - E_{S_j}^{m+1} + \frac{n}{c} \frac{z}{t} (E_{S_j}^{m+1} - E_{S_j}^m) = \frac{G}{j} (|E_{L_j}^{m+1}|^2 E_{S_j}^{m+1} + p_j^m E_{L_j}^{m+1}) - \frac{1}{2} z E_{S_j}^{m+1} \quad (6)$$

* 第四届全国准分子激光学术研讨会推荐优秀论文。

收稿日期: 2002-06-15; 修订日期: 2002-07-09

基金项目: 国家 863 惯性约束聚变领域资助课题

作者简介: 王 超 (1978-), 男, 博士生, 主要从事受激布里渊散射研究工作; 哈尔滨工业大学 309 信箱。

$$E_{L_{j+1}}^{m+1} - E_{L_j}^{m+1} - \frac{n \cdot z}{c \cdot t} (E_{L_j}^{m+1} - E_{L_j}^m) = \frac{G}{j} (|E_{S_j}^{m+1}|^2 E_{L_j}^{m+1} + p_j^* E_{S_j}^{m+1}) + \frac{1}{2} z E_{L_j}^{m+1} \quad (7)$$

其中 $G = (g/4) \cdot t \cdot z$; $t = m \cdot t$, $m = 0, 1, 2, \dots, M$; $z = j \cdot z$, $j = 0, 1, 2, \dots, J$.

$$p_j^m = (p_j^{m-1} + 2A_{L_j}^* A_{S_j}^m) \exp(-t) \quad (8)$$

$$p_j^0 = A_{L_j}^* A_{S_j}^0 \exp(-t) \quad (9)$$

(6) ~ (9) 式为我们采用的数值模型。在数值模拟过程中,假设泵浦光时间上为高斯型函数,空间上为高斯光束,经透镜聚焦后,焦点为光束的束腰位置。

本文脉宽压缩比定义为: $r_c = t_L / t_S$, t_L, t_S 分别为泵浦脉宽和 Stokes 光脉宽。

我们取 SBS 介质折射率为 1; 吸收系数为零; 聚焦透镜为 15cm; 泵浦光的发散角为 0.4mrad; 泵浦脉冲宽度为 20ns; 泵浦峰值功率密度 0.5MW/cm²。

计算结果如图 1, 图 2 所示。图 1 中的三条曲线分别是不同的增益系数 g 下脉宽压缩比随声子寿命变化的曲线。图 2 中的三条曲线分别是不同的声子寿命 τ_B 下脉宽压缩比随增益系数变化的曲线。以上计算采用的是虚拟参数,这有利于了解声子寿命和增益系数这两个因素单独对脉宽压缩比的影响。在实际介质中,声子寿命改变和与之相对应的增益系数改变总是相互联系的。因此本文进一步针对 SF₆ 在不同气压下声子寿命与增益系数同时改变进行数值模拟和实验研究,研究其对脉宽压缩比的影响规律。

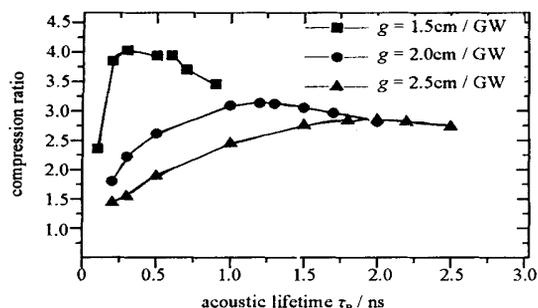


Fig. 1 Pulse compression ratio vs acoustic lifetime

图 1 声子寿命变化对脉冲压缩比影响

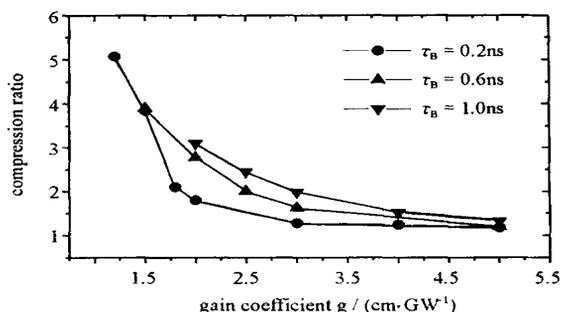


Fig. 2 Pulse compression ratio vs gain coefficient

图 2 增益系数变化对脉冲压缩比的影响

2 实验与理论结果对比分析

实验上以 SF₆ 介质作为研究对象,采用单池聚焦泵浦的 SBS 产生池。通过改变 SF₆ 的气压来改变它的声子寿命和布里渊增益系数,研究介质参数变化对 SBS 能量反射率和脉冲压缩的影响规律,以便为进一步研究选择合适的 SBS 介质提供参考。实验装置如图 3 所示,实验采用 KrF 激光器 (LPX150) 作为泵浦光源,波长 248nm 的激光聚焦后进入充满 SF₆ 介质的 SBS 池中。激光脉宽 40ns, 光束的发散角为 0.3mrad, 光斑大小 9mm × 25mm, 聚焦透镜是平凸透镜。其中能量采用北京物科光电技术公司的激光功率计 (E₁, E₂) 测得, 光波形是利用滨松公司生产的 R1193U-02 型双平面光真空二极管 (D₁, D₂) 及美国 Tek 公司 TDS320 示波器测得。通过改变聚焦透镜和泵浦光的能量, 研究在各种条件下, 不同介质的参数对 SBS 的反射率和脉冲压缩的影响。实验上采用的聚焦透镜在空气中的焦距分别为 15, 50, 100cm。SBS 介质池长 1.5m。我们将实验结果与数值模拟的结果进行对比分析。结果如图 4 所示。

本文采用文献 [2] 中的 SF₆ 在部分气压下的参数。模拟计算声子寿命为 0.3 ~ 1.77ns, 即 SF₆ 的气压为 0.45 ~ 1.95MPa。计算不同条件下的 SBS 脉冲压缩比随 SF₆ 气压即介质参数变化的规律。为方便与实验进行对比, 计算采用的物理参数尽量与实验条件相符。图 4(a) 取聚焦前泵浦能量 81.2mJ, 聚焦透镜的焦距为 50cm。

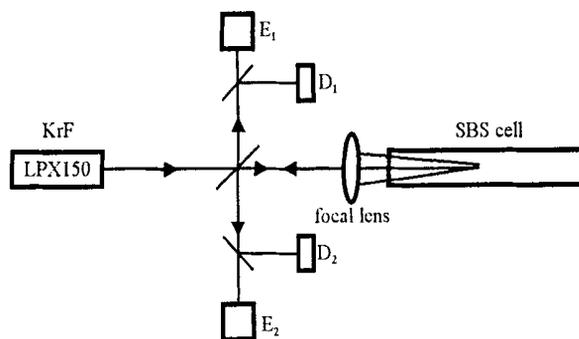


Fig. 3 Schematic of the experimental setup

E₁, E₂: energy meter; D₁, D₂ photo-electric diode

图 3 实验装置示意图

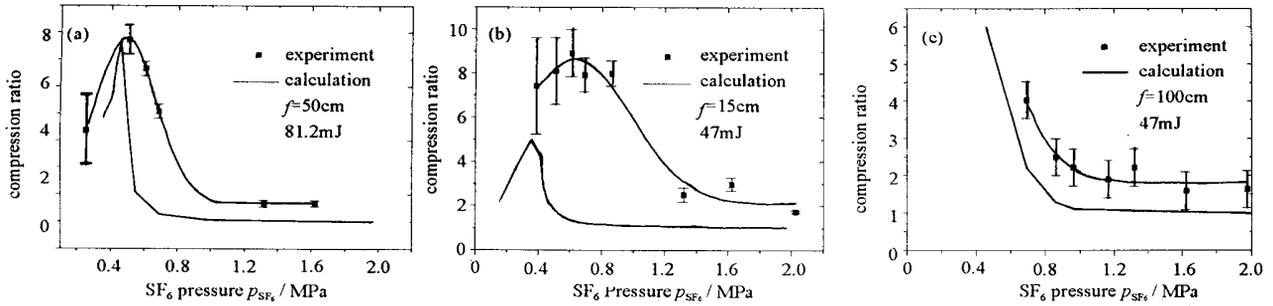


Fig. 4 Pulse compression ratio vs SF₆ pressure
图 4 SF₆ 气压对 SBS 脉冲压缩比的影响

图 4(b) 的计算曲线的计算参数取聚焦前泵浦光能量 47mJ, 聚焦透镜焦距 15cm。图 4(c) 取聚焦透镜焦距 100cm。图 4(a) 中的两条曲线分别对应实验曲线和数值计算曲线。从中我们可以发现随气压的变化, 脉冲压缩比先变大后变小(实验与计算的曲线中都出现一个最佳值), 这说明在其它条件一定的情况下, 选择合适介质参数(主要是声子寿命和布里渊增益系数), 可以更有效的压缩泵浦脉冲。从图 4(b) 也可以清楚的看到这一点。而图 4(c) 显示出的结果则是说明在泵浦能量为 47mJ, 焦距为 100cm 时, 此时脉冲压缩比处于随气体气压的增大而减小的区域。从图 4 的计算曲线与实验曲线的比较可以看出, 实验和计算规律符合。图 5 是泵浦波形与 SBS 波形, SBS 有效压缩了泵浦光。

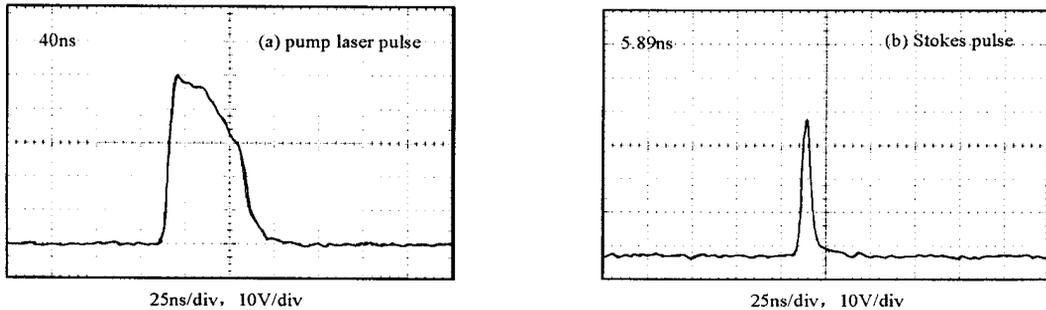


Fig. 5 Pump laser and Stokes pulse
图 5 泵浦光和 Stokes 光波形

将图 4 与图 1 和图 2 比较发现, 当声子寿命与增益系数同时变化时的曲线(图 4)与增益系数变化对 SBS 脉冲压缩的曲线图 2 相似, 这表明在实际情况下, 增益系数的影响比声子寿命的影响大。因此, 在同样的泵浦条件下, 为获得较高的脉冲压缩比, 应该选择增益系数较小的介质。

3 结 论

本文通过对 SBS 产生过程进行了数值模拟, 并利用 SF₆ 作为布里渊介质进行实验研究, 通过改变 SF₆ 的气压改变它的布里渊增益系数和声子寿命来研究介质参数对 SBS 过程的影响。利用虚拟参数计算, 脉冲压缩比仅随声子寿命变化时, 脉冲压缩的曲线有一个峰值, 但是曲线上升和下降的趋势随增益系数的变大而变缓, 也就是说增益系数越小, 介质声子寿命变化对 SBS 脉冲压缩的影响越大。从图 2 中曲线的变化趋势可以发现随介质增益系数的变大, 脉冲压缩比减小。而实验所用的介质, 随声子寿命的变大, 介质的增益系数也跟着变大。从上面的分析中, 可以解释通过改变 SF₆ 气压来同时改变布里渊介质的声子寿命和增益系数, 曲线的脉冲压缩出现最佳点, 超过最佳点后曲线的下降趋势很快。这是由于曲线上升的部分处于增益系数较小的区域, 所以这部分声子寿命变对脉冲压缩比的影响较大。而增益系数较大时, 主要是增益系数的变化影响 SBS 脉冲压缩。图 4 中, 数值模拟的结果与实验结果符合, 说明我们采用的数值模型, 能很好的预测实验结果, 从而对选择合适的介质利用 SBS 进行有效的脉冲压缩, 有一定指导作用。从数值计算和实验的结果, 可以认为要获得较好的脉冲压缩, 应该选择增益系数较小的介质, 而选用对 SF₆, 应该用较低的气压。

参考文献:

[1] Linford GJ. SBS pulse compression for excimer inertial fusion energy drivers[A]. SPIE[C]. 1994, 2117: 154—164.

- [2] Yashin V E. High power laser for fusion with pulse compression [A]. SPIE[C]. 1991, **1839**:175—180.
- [3] Takahashi E, Kuwahara K, Matsumoto Y, et al. High-intensity short KrF laser-pulse generation by saturated amplification of truncated leading-edge pulse[J]. *Optics Communications*, 2000, **185**(12): 431—437.
- [4] Hon D T. Pulse compression by stimulated Brillouin scattering[J]. *Opt Lett*, 1980, **5**(12): 516—518.
- [5] Velechev I, Neshev D, Hogervorst W, et al. Pulse compression to the sub-photon lifetime region by half-cycle gain in transient stimulated Brillouin scattering[J]. *IEEE J QE*, 1999, **135**(12):1812—1816.
- [6] Chu R J, Kanefsky M, Falk J. Numerical study of transient stimulated Brillouin scattering[J]. *J Appl Phys*, 1992, **71**(5):4653—4658.
- [7] Offenberger A A, Thompson D C, Fedosejevs R, et al. Experimental and modeling studies of a Brillouin amplifier[J]. *IEEE J QE*, 1993, **129**(1): 207—216.

Dependence of pulse duration on parameters of medium in Stimulated Brillouin Scattering

WANG Chao¹, LI Zhi-wei¹, LIN Dian-yang¹, WANG Xiao-hui¹, ZHAO Xiao-yan¹,
TANG Xiu-zhang², ZHANG Hai-fen², SHAN Yu-sheng²

(1. Institute of Optoelectronics, P. O. Box 309, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-7, Beijing 102413, China)

Abstract: Stimulated Brillouin Scattering (SBS) is a process to produce the phase conjugated light. Now it is being pursued as a means for pulse compression, beam combination and wavefront reversal. To achieve a high quality short pulse beam, to select a proper medium is very important. In this paper, the effect of parameters of Brillouin mediums on pulse compression of Stimulated Brillouin Scattering process used as a SBS generator are shown theoretically and experimentally. The theoretical model includes transient process, absorption of medium, and pump depletion. The results show that pulse compression ratio is 8 in 0.68MPa. Dependence of pulse compression on the acoustic lifetime and Brillouin gain coefficients is investigated respectively. The results show that pulse compression versus parameters of medium has the best point, because the gain coefficients of real medium change with its acoustic lifetimes. The theoretical and experimental results are consistent.

Key words: stimulated Brillouin scattering; Brillouin medium; pulse compression