

文章编号: 1001-4322(2005)01-0051-04

介质参数对受激布里渊散射特性的影响*

哈斯乌力吉^{1,2}, 吕志伟¹, 何伟明¹, 王双义¹

(1. 哈尔滨工业大学 光电子技术研究所 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 内蒙古民族大学 化学学院, 内蒙古 通辽 028043)

摘 要: 采用一维瞬态模型对受激布里渊散射(SBS)过程进行了数值模拟,研究了介质参数对SBS特性的影响规律,选取FC-72、FC-75、CCl₄、CS₂、丙酮、苯以及CCl₄/乙醇的混合溶液等作为散射介质,在Nd:YAG调Q激光系统下进行了实验研究,比较了各种介质所产生的SBS脉宽、能量反射率和波形之间的差异,由此讨论了介质参数对SBS特性的影响。结果表明,介质增益系数越大,吸收系数越小,SBS能量反射率就越大,吸收系数越大,产生的SBS脉宽就越窄,声子寿命越短,SBS波形前沿就越陡,并且越容易出现调制现象。

关键词: 受激布里渊散射; 液体介质; 增益系数; 吸收系数; 声子寿命

中图分类号: O437.2

文献标识码: A

由于受激布里渊散射具有相位共轭、脉冲压缩、频移量小、转换效率高和后向散射等特点,而且能够实时有效地补偿工作物质的热透镜效应和光学元件所造成的光束相位畸变,从而改善光束质量,获得空间强度分布均匀的衍射极限的优质光束输出。因此,多年来,它在非线性光学相位共轭和脉冲压缩领域得到了广泛的研究,特别是在大功率脉冲激光系统中用以改善光束质量。大量实验研究表明,介质对SBS特性有很大的影响^[1],本文专门针对介质参数对SBS特性的影响进行了研究。

1 数值模拟

采用一维瞬态理论模型对SBS过程进行数值模拟^[2],这个模型包括瞬态影响,介质的吸收以及泵浦耗空的影响。斯托克斯场和泵浦场由麦克斯韦波动方程描述,介质中的声波场由纳维-斯托克斯(Navier-Stokes)能量传输方程给出。在平面波近似下,略去空间二阶导数及忽略时间二阶微分项,得到瞬态受激布里渊散射耦合波方程组为

$$\frac{\partial E_L}{\partial z} - \frac{n}{c} \frac{\partial E_L}{\partial t} = -ig_L \rho E_S + \frac{\alpha}{2} E_L \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_S}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial E_S}{\partial t} = ig_S \rho^* E_S - \frac{\alpha}{2} E_L \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \Gamma Q = ig_a E_L E_S^* \quad (3)$$

式中 E_L 和 E_S 分别为泵浦光场和斯托克斯场复振幅, Q 为声波场振幅(声波场用介质的密度偏离其平均值 ρ_0 的变化值 $\tilde{\rho}(z,t)$ 来描述,用复振幅 $\rho(z,t)$ 来表示密度的变化),带有星号的场是相对应的复共轭场; $\Gamma = 1/(2\tau)$ 为受激布里渊散射线宽,其中 τ 为介质的声子寿命; α 为介质的吸收系数; c 为真空光速; n 为介质的折射率; g_L

$= \frac{\gamma\omega_L}{4cn\rho_0}$, $g_S = \frac{\gamma\omega_S}{4cn\rho_0}$, $g_a = \frac{\gamma q^2}{16\pi\Omega}$ 代表了光子-声子耦合常数; γ 是介质的电致伸缩系数; ρ_0 是介质的未扰密度;

$\Omega = \omega_L - \omega_S$, 其中 ω_L , ω_S 和 Ω 分别为泵浦光波、斯托克斯光波和声波的角频率; $q = k_L - k_S$, 其中 k_L , k_S 和 q 分别为泵浦光波、斯托克斯光波和声波场的波矢,并且有关系式 $\Omega = qv$, 其中 v 表示声波在介质中的传播速度。

令 $g_L \approx g_S = g_2$, $g_a = g_1$, 对(3)进行积分后带入(1)(2)式,并考虑截面 σ 的变化,得到

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} - \frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) E_L = \frac{g\Gamma}{2\sigma} E_S^* \int_0^t E_S^* E_L \exp[-\Gamma(t-\tau)] d\tau + \frac{1}{2} \alpha E_L \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t}\right) E_S = \frac{g\Gamma}{2\sigma} E_S \int_0^t E_L^* E_S \exp[-\Gamma(t-\tau)] d\tau - \frac{1}{2} \alpha E_S \quad (5)$$

* 收稿日期 2003-12-22; 修订日期 2004-08-02

基金项目 国家自然科学基金资助课题(60278033 和 60088001)

作者简介 哈斯乌力吉(1971—),男,蒙古族,内蒙古通辽,讲师,博士研究生,主要从事非线性光学方面的研究;E-mail: hasiwuliji@sohu.

式中 $g = 4g_1g_2/F$ 功率 $P_L = |E_L|^2$ $P_S = |E_S|^2$ 。边界条件为 $E_{S0}(z=0, t) = E_{S0}(t)$ 和 $E_{L1}(z=L, t) = E_{L1}(t)$ L 为池长。这样构成完整的数学模型。在空间上采用向后插商, 时间上采用隐格式有限差分, 对(4)和(5)式进行离散化和数值求解^[3]。

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。取透镜焦距为 30 cm, 泵浦光的发散角为 0.8 mrad, 泵浦脉宽为 8.0 ns, 泵浦峰值功率密度为 15 MW/cm², 介质的折射率为 1.5, 增益系数为 10 cm/GW, 吸收系数为 0.005 cm⁻¹, 声子寿命为 1.0 ns。

介质的增益系数、吸收系数、声子寿命是影响其 SBS 特性的主要因素。从理论上计算出了它们对 SBS 特性的影响。当泵浦光能量恒定, 瑞利长度 ($b = 2\pi w_0^2/\lambda$, 其中 $w_0 = f\theta$ 为光束束腰半径 f 为透镜焦距 θ 为光束发散角 λ 为泵浦光波长) 完全在产生池中时, 能量反射率主要由介质的增益系数和吸收系数来决定^[4]。增益系数越大, 能量转换效率越高, 因此随着增益系数的增大能量反射率逐渐增大(如图 1 所示)。吸收系数越大, 介质对泵浦光和 Stokes 光的吸收就越多, 因此随着吸收系数的增大能量反射率逐渐降低(如图 2 所示)。另外, 吸收系数越大, 焦点附近的泵浦功率密度越低, SBS 产生时间越晚, 所产生的 Stokes 光与泵浦光峰值附近相遇, 互耦合作用强, 因此随着吸收系数的增大 SBS 脉宽逐渐变窄(如图 3 所示)。SBS 前沿上升时间(前沿的 10% ~ 90% 的时间)虽然受到各种参数的影响, 但是声子寿命对 SBS 前沿上升时间的影响特别明显。声子寿命越长, 介质响应速度就越慢, 声子场建立与衰减所需的时间就越长。因此随着声子寿命的变长, SBS 波形前沿上升时间也变长, 即前沿变缓(如图 4 所示)。

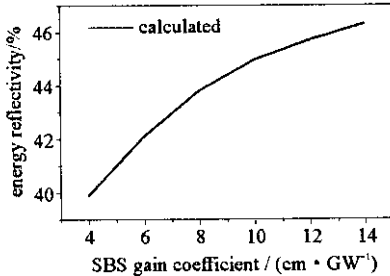


Fig. 1 Energy reflectivity vs the gain factor
图1 能量反射率随增益系数的变化关系

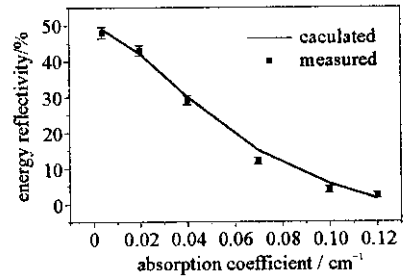


Fig. 2 Energy reflectivity vs the absorption coefficient
图2 能量反射率随吸收系数的变化

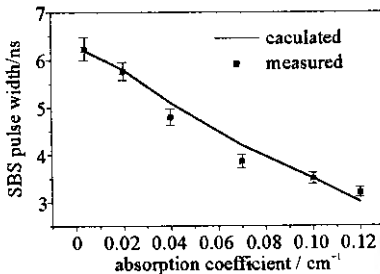


Fig. 3 SBS pulse width vs the absorption coefficient
图3 SBS 脉宽随吸收系数的变化关系

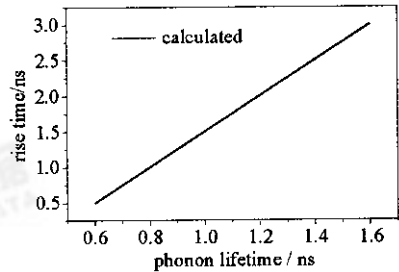


Fig. 4 Rise time vs the phonon lifetime
图4 上升时间随声子寿命的变化关系

2 实验研究

实验装置如图 5 所示, Nd: YAG 调 Q 激光器由全反射镜 (M_1)、调 Q 染料片、偏振片 (P_1)、Nd: YAG 棒、小孔光阑 (hole) 和部分反射镜 (M_2) 组成。偏振片 P_2 和偏振片 P_1 平行, P_2 和 1/4 波片组成隔离器, 防止 SBS 后向散射放大光进入 YAG 振荡器。振荡器输出的 P 偏振光经 1/4 波片后变成圆偏振光, 入射到 SBS

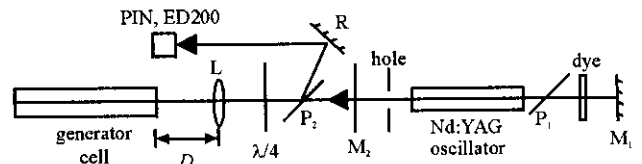


Fig. 5 Experimental setup

图5 实验装置图

系统。SBS 系统由聚焦透镜 L (焦距为 $f = 30$ cm) 和产生池 (池长为 60 cm) 组成。由相位共轭镜返回的 Stokes 光经过 1/4 波片后变为 S 偏振光, 被偏振片 P_2 反射, 经反射镜 R 输出。输出的泵浦光和 SBS 光的能量用能量计 ED200 探测, 脉宽和脉冲波形用 PIN 光电二极管探测, 并用数字示波器 TDS684A 来记录。

实验互选数据: -72、FC-75、CCl₄、CS₂、丙酮、苯以及 CCl₄/乙醇的混合溶液等作为散射介质, 以上介质的 SBS

参数(在波长 $1.064 \mu\text{m}$ 温度 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 下)由表 1 列出,其中带有星号的参数是根据文献 [5] 的方程计算而得,其它参数摘自文献 [6, 7, 8]。

表 1 液体介质的 SBS 参数

Table 1 Some related SBS parameters of liquid media

	FC-72	FC-75	CCl_4	CS_2	Acetone	Benzene	Ethanol
refractive index	1.251	1.268	1.460	1.595	1.358	1.501	1.361
absorption coefficient / cm^{-1}	10^{-5}	10^{-5}	0.003	0.003	0.022	0.024	0.119
SBS threshold / mJ	2.5	3.4	3	6	7	—	22
SBS gain coefficient / ($\text{cm} \cdot \text{GW}^{-1}$)	6	4.5	6	68	15.8	9.6	12
phonon lifetime / ns	1.2	0.9	0.6	6.4	2.67	1.4*	0.9*

实验时 Nd: YAG 调 Q 激光器输出的泵浦光脉宽为 8.0 ns , 能量为 10.0 mJ , 镜-池间距 (D) 分别为 $2, 12$ 和 22 cm 。该实验条件下, 以上介质均不出现光学击穿现象, 并且所产生的 SBS 波形无调制现象。各种介质的 SBS 特性由表 2 列出。

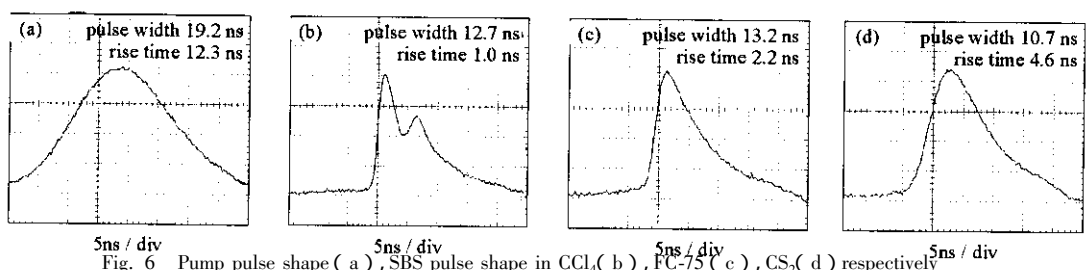
表 2 不同介质在不同镜-池间距 (D) 下所产生的 SBS 脉宽和能量反射率Table 2 Measured SBS pulse-width and energy reflectivity for different D and liquid media

	FC-72	FC-75	CCl_4	CS_2	Acetone	Benzene
$D = 2 \text{ cm}$	pulse width/ns	4.1	4.0	3.9	3.7	3.6
	energy reflectivity/%	23.3	18.4	22.2	29.4	8.3
$D = 12 \text{ cm}$	pulse width/ns	4.9	4.9	5.0	4.8	4.7
	energy reflectivity/%	23.8	18.8	22.7	30.0	13.8
$D = 22 \text{ cm}$	pulse width/ns	5.6	5.6	5.8	6.4	6.5
	energy reflectivity/%	24.3	19.4	23.3	31.1	20.5

表 2 前四种介质 FC-72、FC-75、 CCl_4 和 CS_2 的吸收系数均很小, 介质对泵浦光和 Stokes 光的吸收较小, 可忽略吸收系数对能量反射率的影响, 因此它们的能量反射率主要由增益系数的大小来决定。它们当中增益系数最大的是 CS_2 , 其次 FC-72 和 CCl_4 , 最小的是 FC-75。因此, 它们当中能量反射率最高的是 CS_2 , 其次 FC-72 和 CCl_4 , 最小的是 FC-75。另外, 当吸收系数较小时, 聚焦深度对能量反射率的影响也很小, 因此不同镜-池间距 (D) 下, 它们的能量反射率的差异不明显。丙酮和苯的吸收系数相对比较大, 不可忽略吸收系数对能量反射率的影响, 其能量反射率由增益系数和吸收系数的共同作用来决定。随着聚焦深度变浅(即镜-池间距 D 的变大), 介质对泵浦光和 Stokes 光的吸收逐渐减小, 因此能量反射率逐渐提高。由于乙醇的吸收系数过大, 在该实验条件下探测不到其所产生的 Stokes 光, 因此表 2 中未列出乙醇的 SBS 特性。

选用 CCl_4 /乙醇的混合溶液作为散射介质, 研究了吸收系数对 SBS 特性的影响。由于 CCl_4 和乙醇的互溶性很好, 其吸收系数有较大的相对差异(两个数量级), 而其它 SBS 参数的相对差异较小(几倍), 因此随着乙醇混合比的增加, 其吸收系数迅速增大, 而其它 SBS 参数的变化相对比较小。实验时先测定不同体积比 CCl_4 /乙醇混合介质的吸收系数, 然后对其进行了 SBS 特性的研究, 进而获得了吸收系数对 SBS 特性的影响, 理论计算和实验结果的变化趋势基本一致, 如图 2 和图 3 所示。

为了更清晰地显示出声子寿命对 SBS 特性的影响规律, 在相同实验条件下(泵浦光脉宽为 $19.0 \sim 20.0 \text{ ns}$, 能量约为 15.0 mJ), 测定了以上介质的 SBS 波形, 如图 6 所示。从图中可看出, 以上介质中 SBS 波形前沿最陡的是 CCl_4 , 而 SBS 波形前沿最缓的是 CS_2 。从表 1 中可知, 以上介质中 CCl_4 的声子寿命最短, 而 CS_2 的

Fig. 6 Pump pulse shape (a), SBS pulse shape in CCl_4 (b), FC-75 (c), CS_2 (d) respectively

声子寿命最长。这就说明,理论模拟与实验结果吻合得很好。另外,声子寿命对调制现象也有很大的影响。声子寿命越短,介质响应速度就越快,各尖峰的时间间隔越短,因此SBS波形就越容易出现调制现象^[9]。例如该实验条件下,以上介质中只有 CCl_4 的SBS波形出现调制现象。

3 结 论

数值模拟和实验结果表明,当泵浦光能量恒定,瑞利长度完全在产生池中时,介质的增益系数越大,吸收系数越小,SBS能量反射率就越大;吸收系数越大(或泵浦能量越小),SBS脉宽就越窄;声子寿命越短,SBS波形前沿就越陡,并且越容易出现调制现象。本文对SBS介质的选取具有一定的参考作用。

参考文献:

- [1] Andreev N F, Khazanov E, German A P. Application of Brillouin cell to high repetition rate solid-state laser[J]. *IEEE J Q E*, 1992, **28**(1):330—341.
- [2] Chu R J, Kanefsky M, Falk J. Numerical study of transient stimulated Brillouin scattering[J]. *J Appl Phys*, 1992, **71**(5):4653—4658.
- [3] 王超,吕志伟,林殿阳,等. 介质参数对受激布里渊散射脉宽压缩的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(5):713—716. (Wang C, Lü Z W, Lin D Y, et al. Dependence of pulse duration on parameters of medium in stimulated Brillouin scattering[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(5):713—716)
- [4] 刘莉,吕志伟,何伟明,等. 单池受激布里渊散射脉冲波形的研究[J]. *中国激光*, 2000, **27**(1):53—58. (Liu L, Lü Z W, He W M, et al. Study of SBS pulse waveform in a one-cell system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, **27**(1):53—58)
- [5] Erokhin A I, Kovalev V I, Faizullov F S. Determination of the parameters of a nonlinear response of liquids in an acoustic resonance region by the method of nondegenerate four-wave interaction[J]. *Sov J Quantum Electron*, 1986, **16**(7):872—877.
- [6] 哈斯乌力吉,吕志伟,何伟明. 受激布里渊散射中的液体介质[J]. *激光技术*, 2003, **27**(3):216—219. (Hasi W L J, Lü Z W, He W M, et al. Liquid medium in stimulated Brillouin scattering[J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(3):216—219)
- [7] Kaiser W, Maier M. *Laser Handbook*[M]. Amsterdam:North-Holland Publ. Co., 1972. 1077—1150.
- [8] Yoshida H, Kmetik V, Fujita H, et al. Heavy fluorocarbon liquids for a phase-conjugated stimulated Brillouin scattering[J]. *Appl Opt*, 1997, **36**(16):3739—3744.
- [9] Afshaarvahid S, Devrelis V, Munch J. Nature of intensity and phase modulation in stimulated Brillouin scattering[J]. *Physical Review A*, 1998, **57**(5):3961—3971.

Influence of medium parameters on the characteristics of stimulated Brillouin scattering

HASI Wu-li-ji^{1,2}, LÜ Zhi-wei¹, HE Wei-ming¹, WANG Shuang-yi¹

(1. Institute of Opto-electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Faculty of Chemistry, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao 028043, China)

Abstract: SBS process was simulated numerically based on a one-dimensional transient model. The influence of Brillouin media on SBS characteristics was studied. A variety of media, such as FC-72, FC-75, CCl_4 , CS_2 , Acetone, Benzene, and mixture liquid of CCl_4 /Ethanol, are investigated experimentally with a Nd:YAG Q-switched laser, and comparison is made between the SBS characteristics, such as the SBS pulse-width, the energy reflectivity and the SBS pulse shape. It is shown that a large gain factor corresponds to a small absorption coefficient and a large SBS energy reflectivity; a large absorption coefficient corresponds to a short SBS pulse-width; and a short phonon lifetime corresponds to a short SBS rise time. The modulation of SBS pulse shape tends to occur with a short phonon lifetime.

Key words: Stimulated Brillouin scattering; Liquid medium; Gain coefficient; Absorption coefficient; Phonon lifetime