

受激布里渊散射光脉冲波形的研究^{*}

哈斯乌力吉 吕志伟[†] 滕云鹏 刘述杰 李 强 何伟明

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

(2006 年 5 月 31 日收到, 2006 年 6 月 22 日收到修改稿)

从实验和理论上研究了受激布里渊散射(SBS)光脉冲波形. 在 Nd:YAG 调 Q 激光器中实验研究了 SBS 光脉冲波形随抽运光参数、结构参数和介质参数的变化规律, 并利用 SBS 理论模型进行了数值模拟, 实验与数值模拟结果的变化趋势基本一致. 结果表明, 抽运光能量越小, 透镜焦距越短, 镜-池间距越长, 介质声子寿命越长, SBS 光脉冲波形就越不容易出现调制现象. 分析和讨论了抽运光参数、结构参数和介质参数对 SBS 光脉冲波形的影响机理.

关键词: 受激布里渊散射, 脉冲波形, 抽运光参数, 结构参数

PACC: 4265C, 4265F

1. 引 言

由于受激布里渊散射(SBS)具有相位共轭特性, 能够消除光传输过程中的相位畸变, 提高光束质量, 因此多年来 SBS 相位共轭一直被广泛地研究^[1,2]. 虽然文献[3]中研究了单池 SBS 光脉冲波形, 但主要针对的是出现严重调制现象时不同尖峰之间强度、脉宽和间距的变化规律. 在实验中发现, 实验条件对调制现象的出现有很大的影响, 通过调节实验条件可消除或减弱调制现象, 这对获得平滑的 SBS 光脉冲波形具有一定的指导意义. 本文在 Nd:YAG 调 Q 激光器中实验研究了 SBS 光脉冲波形随抽运光参数、结构参数和介质参数的变化规律, 并利用 SBS 理论模型进行了数值模拟, 实验与数值模拟结果的变化趋势基本一致. 结果表明, 抽运光能量越小, 透镜焦距越短, 镜-池间距越长, 介质声子寿命越长, SBS 光脉冲波形就越不容易出现调制现象. 调制现象是指, 在 SBS 阈值处, Stokes 散射光功率迅速上升, 并超过抽运光功率, 此时增益开始下降, 增益的下降, 导致 Stokes 散射光功率的下降, 此时抽运光能量又开始增加, 并导致增益的增加, 增益的增加, 又导致 Stokes 散射光功率的提高, 这样抽运光和 Stokes 散射光之间能量交换过程中形成的弛豫振荡^[4].

2. 实验研究

2.1. 实验装置及介质的选取

实验装置如图 1 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 后向散射放大光回到 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, 进入单池 SBS 系统, 它由聚焦透镜和 SBS 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. 抽运光和 SBS 光的能量用 OPHIR 激光能量计探测, 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. 实验时 Nd:YAG 调 Q 激光器输出光波长为 1.064 μm , 重复率为 1 Hz, 脉冲宽度为 10.0 ns, 发散角为 1.6 mrad(5 倍衍射极限), 最高能量为 50 mJ, 输入能量的变化通过加入衰减片来实现.

研究抽运参数和结构参数对 SBS 光脉冲波形的影响时, 选取 FC-72 作为散射介质, 该介质的光学击穿阈值(OBT)特别高(100 GW/cm^2), 因此可消除光学击穿现象的干扰. 研究介质参数对 SBS 光脉冲波

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10476009, 60478020)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zw_lu@sohu.com

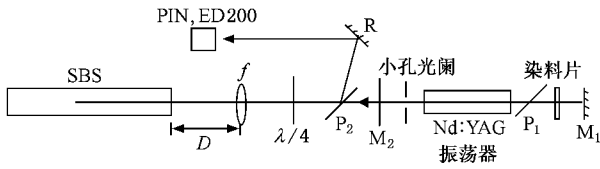


图 1 实验装置示意图

形的影响时,选取 FC-72, CCl₄, CS₂ 和 C₃H₆O(丙酮)等作为散射介质,以上介质的 SBS 参数由表 1 列出.

表 1 液体介质的 SBS 参数^{5,6,1}

	n	a/cm^{-1}	$g/(cm/GW)$	τ/ns	OBT/(GW/cm ²)
CS ₂	1.595	0.003	68	6.4	20
FC-72	1.251	10 ⁻⁵	6	1.2	100
CCl ₄	1.460	0.003	6	0.6	16
C ₃ H ₆ O	1.358	0.022	15.8	2.67	24

2.2. 实验结果

图 2(a)(b)(c)和(d)是散射介质为 FC-72,透镜焦距为 30 cm,镜-池间距为 0 cm 时,SBS 光脉冲波形(本文中的所有实验波形均为 2 ns/div)随抽运光能量变化的实验图.从图可看出,抽运光能量低时,SBS 脉冲波形不出现调制现象,而抽运光能量高时,SBS 光脉冲波形出现调制现象.

图 3(a)(b)(c)和(d)是散射介质为 FC-72,抽运光能量为 15 mJ,透镜焦距为 30 cm 时,SBS 光脉冲波形随镜-池间距 D 变化的实验图.从图 3 可看出,镜-池间距长时,SBS 光脉冲波形不出现调制现象,而镜-池间距短时,SBS 光脉冲波形出现调制现象.

图 4(a)(b)(c)和(d)是散射介质为 FC-72,抽运光能量为 15 mJ,镜-池间距为 0 cm 时,SBS 光脉冲

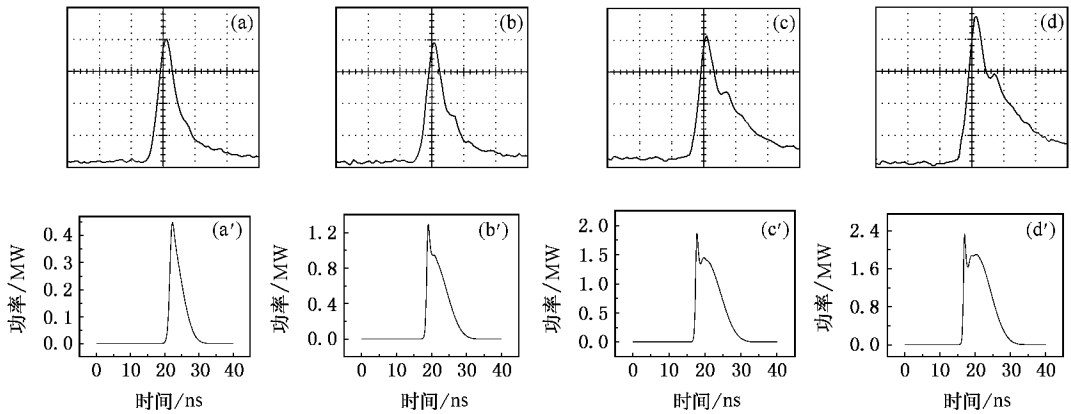


图 2 SBS 光脉冲波形随抽运光能量的变化关系 (a)(b)(c)和(d)为实验结果 (a')(b')(c')和(d')为数值模拟结果,其抽运光能量分别为 5,10,20 和 30 mJ

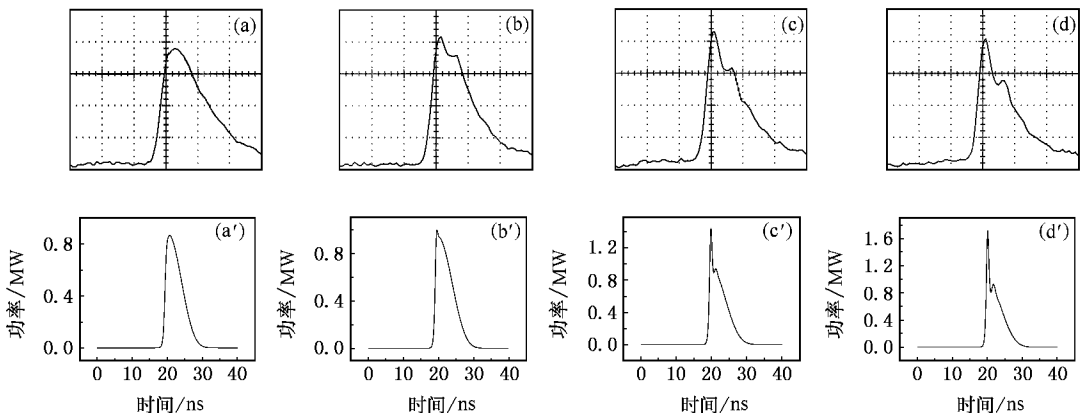


图 3 SBS 光脉冲波形随有效作用长度的变化关系 (a)(b)(c)和(d)为实验结果 (a')(b')(c')和(d')为数值模拟结果,其镜-池间距分别为 25,20,10 和 0 cm

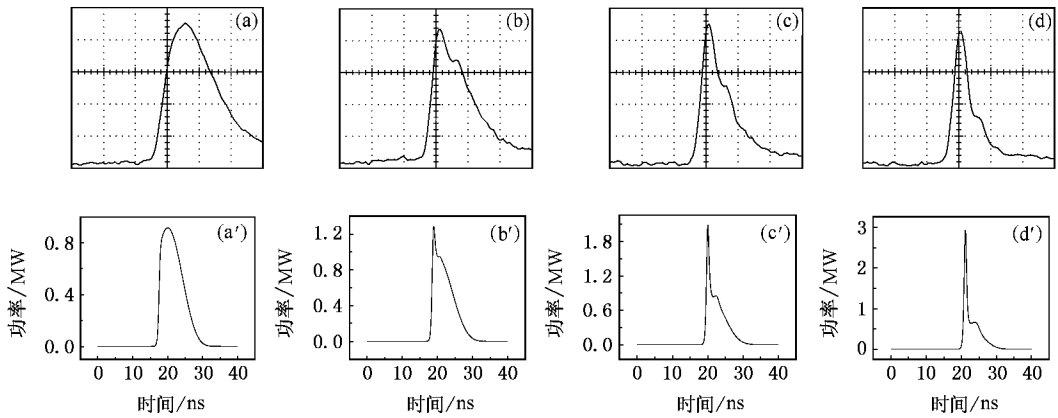


图4 SBS光脉冲波形随透镜焦距的变化关系 (a)(b)(c)和(d)为实验结果 (a')(b')(c')和(d')为数值模拟结果,其透镜焦距分别为5,10,15和20 cm

波形随透镜焦距 f 的变化规律.从图4可看出,透镜焦距短时,SBS光脉冲波形不出现调制现象;而透镜焦距长时,SBS光脉冲波形出现调制现象.

图5(a)(b)(c)和(d)是抽运光能量为15 mJ,镜-池间距为0 cm,透镜焦距为30 cm时,SBS光脉冲波形随不同介质变化的实验图.虽然所有介质参数

对SBS光脉冲波形都有一定的影响,但是声子寿命的影响特别明显.从图5可看出,选用声子寿命长的 CS_2 作为散射介质时,SBS光脉冲波形不出现调制现象,而选用FC-72, CCl_4 和 $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ 等声子寿命短的散射介质时,SBS光脉冲波形出现调制现象.

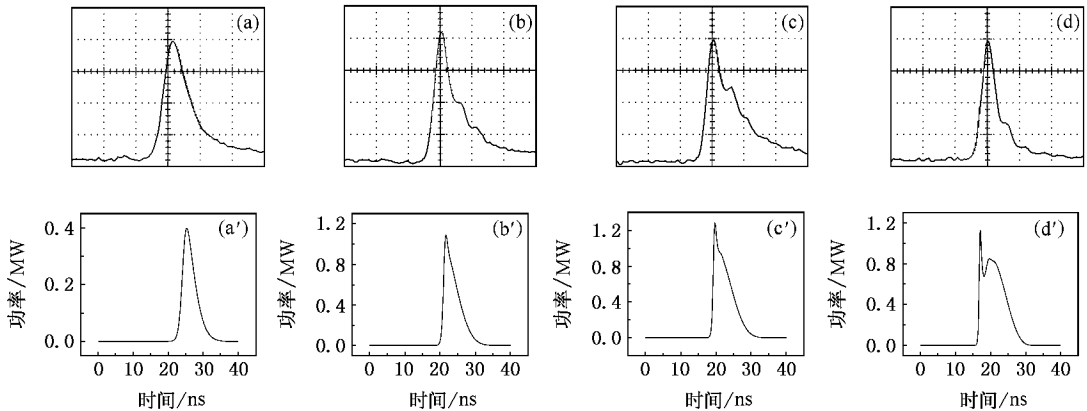


图5 SBS光脉冲波形随介质声子寿命的变化关系 (a)(b)(c)和(d)为实验结果,其介质分别为 CS_2 ,FC-72, CCl_4 和 $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$ (a')(b')(c')和(d')为数值模拟结果,其介质声子寿命分别为4.5,2.5,1.5和0.5 ns

3. 理论研究

利用文献[7,8]的SBS理论模型,数值模拟了SBS光脉冲波形随抽运光能量、透镜焦距、镜-池间距和介质声子寿命的变化规律.在数值模拟过程中,假设抽运光时间上高斯型函数,空间上高斯光束,经透镜聚焦后,焦点为光束的束腰位置.数值模拟时所需要的相关参数的取值如下^[9,10]:抽运光波长为

$1.064 \mu\text{m}$,重复率为1 Hz,脉冲宽度为10.0 ns,发散角为1.6 mrad,介质增益系数为6 cm/GW,折射率为1.5,吸收系数为 0.003 cm^{-1} .若常量时取抽运光能量为15 mJ,镜-池间距为0 cm,透镜焦距为30 cm,声子寿命为1.2 ns,若变量时取值如图2—5所示.

图2(a')(b')(c')和(d')是SBS光脉冲波形随抽运光能量变化的数值模拟图,与实验波形的变化趋势基本一致.从图可看出,抽运光能量低时,SBS光脉冲波形不出现调制现象;而抽运光能量高时,

SBS 光脉冲波形出现调制现象. 抽运光以聚焦形式入射到散射介质中时, 在强度超过 SBS 阈值处, 由于电致伸缩效应, 将引起超声振荡, 形成超声光栅, 对抽运光进行反射, 抽运光与声子场耦合, 将会产生后向的 Stokes 散射光. 产生的 Stokes 散射光、声波和抽运光相互作用, 将导致抽运光能量向 Stokes 散射光转移^[11, 12]. 抽运光能量向 Stokes 散射光转移时, 由于抽运光功率和 Stokes 散射光功率的交替变化将会导致调制现象. 当抽运光能量提高时, 系统指数增益系数 $G = gIL$ (式中 g 为介质增益系数, I 为抽运光功率密度, L 为有效作用长度) 变大, 加快抽运光和 Stokes 散射光的能量交换过程, 进而提高弛豫振荡频率, 因此 SBS 光脉冲波容易出现调制现象. 介质增益系数 g 的增大或有效作用长度 L 的变长, 同样也会提高系统指数增益系数, 因此也会促使 SBS 光脉冲波形调制现象的出现. 例如其他条件相同时, SBS 光脉冲波形随镜-池间距的变短(即有效作用长度的变长)出现调制现象, 如图 3 所示.

图 4 (a') (b') (c') 和 (d') 是 SBS 光脉冲波形随透镜焦距变化的数值模拟图, 与实验波形的变化趋势基本一致. 从图可看出, 透镜焦距短时, SBS 光脉冲波形不出现调制现象, 而透镜焦距长时, SBS 光脉冲波形出现调制现象. 这是因为 SBS 起源于自发布里渊散射噪声, 因此 Stokes 散射光强度受到噪声场强度的影响^[13]. 当透镜焦距变短时, 抽运光功率密度迅速提高, 并产生强的声波场, 在强声波场中, Stokes 散射光能量下降缓慢, 进而阻碍弛豫振荡, 因此 SBS 光脉冲波形不易出现调制现象^[4]. 另外, 透镜焦距变短时, Stokes 散射光与抽运光的有效作用长度变短, 其能量交换来不及形成弛豫振荡, 因此 SBS 光脉冲波形也不易出现调制现象. 改变透镜焦距时,

系统指数增益系数对 SBS 光脉冲波形的影响较小, 这是因为透镜焦距变短时, 虽然抽运光功率密度变大, 但是有效作用长度变短, 并且抽运光功率密度与透镜焦距的平方成反比 ($I = P/\pi\omega^2 = 4P/\pi\theta^2 f^2$, 式中 P 为抽运光功率, $\omega = \theta f/2$ 为高斯光束束腰半径, θ 为抽运光远场发散角, f 为透镜焦距长度), 有效作用长度与透镜焦距的平方成正比(有效作用长度一般取 5 倍瑞利长度^[14], 瑞利长度为 $L = 2\pi\omega^2/\lambda = \pi\theta^2 f^2/2\lambda$), 因此系统指数增益系数 $G = gIL$ 几乎是恒定值.

图 5 (a') (b') (c') 和 (d') 是 SBS 光脉冲波形随介质声子寿命变化的数值模拟图, 与实验波形的变化趋势基本一致. 从图 5 可看出, 介质声子寿命长时, SBS 光脉冲波形不出现调制现象, 而声子寿命短时, SBS 光脉冲波形出现调制现象. 这是因为声子寿命代表着声场的惯性, 声子寿命越长, 声场的惯性越大, Stokes 散射光与抽运光能量交换过程中声波场的反应就越慢, 进而阻碍弛豫振荡, 因此 SBS 光脉冲波形不出现调制现象^[4].

4. 结 论

在 Nd:YAG 调 Q 激光器中实验研究了 SBS 光脉冲波形随抽运光参数、结构参数和介质参数的变化规律, 并利用 SBS 理论模型进行了数值模拟, 实验与数值模拟结果的变化趋势基本一致. 结果表明, 抽运光能量越小, 透镜焦距越短, 镜-池间距越长, 介质声子寿命越长, SBS 光脉冲波形就越不容易出现调制现象. 通过调节抽运光参数、结构参数和介质参数可消除或减弱调制现象, 这对获得平滑的 SBS 光脉冲波形具有一定的指导意义.

[1] Wang X H, Lü Z W, Lin D Y, Wang C, Zhao X Y 2004 *Chin. Phys.* **13** 1734

[2] Yang J, Lü Z W, He W M, Lü Y L 2005 *Chin. Phys.* **14** 343

[3] Liu L, Lü Z W, He W M, Wang Q, Ma Z G 2000 *Chin. J. of Lasers* **27** 53 (in Chinese) [刘莉、吕志伟、何伟明、王骐、马祖光 2000 中国激光 **27** 53]

[4] Afshaarvahid S, Devrelis V, Munch J 1998 *Phys. Rev. A* **57** 3961

[5] Yoshida H, Kmetik V, Fujita H, Nakatsuka M, Yamanaka T, Yoshida K 1997 *Appl. Opt.* **36** 3739

[6] Erokhin A I, Kovalev V I, Faizullov F S 1986 *Sov. J. Quantum Electron.* **16** 872

[7] Wang C, Lü Z W, Lin D Y, Wang X H, Zhao X Y 2002 *High Power Laser and Partial Beams* **14** 713 [王超、吕志伟、林殿阳、王晓慧、赵晓彦 2002 强激光与粒子束 **14** 713]

[8] Hasi W L J, Lü Z W, He W M, Wang S Y 2005 *High Power Laser and Partial Beams* **17** 51 [哈斯乌力吉、吕志伟、何伟明、王双义 2005 强激光与粒子束 **17** 51]

[9] Lü Z W, Lü Y L, Yang J 2003 *Chin. Phys.* **12** 507

[10] Lü Z W, Ding Y C, He W M 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1286 (in Chinese) [吕志伟、丁迎春、何伟明 2002 物理学报 **51** 1286]

[11] Ding Y C, Lü Z W, He W M 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2767 (in Chinese) [丁迎春、吕志伟、何伟明 2002 物理学报 **51** 2767]

- [12] Hasi W L J , Lü Z W , He W M , Wang S Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 742 (in Chinese) [哈斯乌力吉、吕志伟、何伟明、王双义 2005 物理学报 **54** 742]
- [13] Han Y , Tan J C , Ding L , Jing F , Zhang X M 1999 *Chin. J. of Lasers* **26** 405 (in Chinese) [韩 勇、谭吉春、丁 磊、景 峰、张小民 1999 中国激光 **26** 405]
- [14] Wang P , Zhang W J , Ge C W , Su H , Shao J 2001 *Chin. J. of Quantum Electronics* **18** 544 (in Chinese) [王 沛、张为俊、葛传文、苏 红、邵 杰 2001 量子电子学报 **18** 544]

Study on stimulated Brillouin scattering pulse waveform^{*}

Hasi Wu-Li-Ji Lü Zhi-Wei[†] Teng Yun-Peng Liu Shu-Jie Li Qiang He Wei-Ming

(*Institute of Opto-electronics , Harbin Institute of Technology , Harbin 150001 , China*)

(Received 31 May 2006 ; revised manuscript received 22 June 2006)

Abstract

In this paper , the pulse waveform of stimulated Brillouin scattering (SBS) is investigated experimentally and theoretically . The variations of SBS pulse waveform with pump parameters , structural parameters and medium parameters are experimentally investigated with a Nd:YAG *Q*-switched laser , and numerically simulated using SBS theory model . The theoretical calculations are in good agreement with the experimental results . The results indicate that modulation of pulse waveform is difficult to realize with low pump energy , short focal length , long lens-cell distance and long phonon life time . The influence of the pump parameters , structural parameters and medium parameters on SBS pulse waveform is discussed extensively .

Keywords : stimulated Brillouin scattering , pulse waveform , pump parameter , structural parameter

PACC : 4265C , 4265F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10476009 , 60478020) .

[†] Corresponding author . E-mail : zw_lu@sohu.com