

陡前沿脉冲产生的受激布里渊散射 稳定性研究*

何伟明 吕志伟 王 骥 马祖光

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

摘 要 受激布里渊散射(SBS)转换效率及相位共轭保真度的稳定性与泵浦脉冲的前沿上升时间有关,对前沿上升时间与介质声学声子寿命接近的泵浦脉冲,在泵浦能量超过受激布里渊散射阈值较多时,会造成严重的相位共轭保真度不稳定。本文针对上升前沿时间为2 ns的泵浦脉冲及声学声子寿命约1 ns的 CCl_4 介质,在泵浦脉冲前沿根部引入缓慢上升的小信号后,采用振放双池受激布里渊散射相位共轭镜,在泵浦激光能量达到500倍受激布里渊散射阈值时,仍获得了稳定的受激布里渊散射,其转换效率起伏在4%以内,相位保真度稳定度在5%以内。

关键词 受激布里渊散射, 相位共轭镜, 相位共轭保真度。

1 引 言

在激光系统中应用受激布里渊散射可以补偿光路中由光学元件所引起的光学畸变。就实际应用而言,受激布里渊散射转换效率、相位共轭保真度及其稳定性是衡量受激布里渊散射相位共轭镜的重要参数。关于受激布里渊散射相位共轭保真度稳定性随泵浦激光能量增大有两种报道结果,一种是随着泵浦能量的增大,受激布里渊散射保真度能保持较高的数值,几乎为一常数^[1~3];另一种结果为泵浦激光能量在超过阈值许多倍后,受激布里渊散射相位共轭保真度开始下降^[4~5]。理论计算的结果表明,这两种结果也确实存在的^[6~7]。文献[8]分析了导致保真度不稳定的原因,指出受激布里渊散射相位共轭保真度对泵浦脉冲前沿的上升斜率是很敏感的。对于一个脉宽即使比介质声学声子寿命长的泵浦激光,若其前沿上升时间接近于或小于介质声学声子寿命,那么一开始在受激布里渊散射对泵浦光还没有明显抽空的时候,在透镜焦点区域有较大的光泵体积超过受激布里渊散射阈值,这就造成噪声模的放大,并直接与相位共轭(PC)模相互竞争,从而降低了相位共轭模对噪声模的鉴别能力。而在泵浦脉冲前期低功率部位一旦相位共轭模经选择性放大后,随着泵浦功率的持续增大,可以抑制其它噪声模达到阈值。所以为得到稳定的受激布里渊散射相位共轭保真度,泵浦脉冲的前沿形状非常关键,另一方面则要求介质声学声子寿命应足够的短。就目前人们对受激布里渊散射的研究,一般多用十几纳秒以上的泵浦脉冲,但激光驱动器物理实验一般需要几个纳

* 本课题得到国家高技术惯性约束聚变主题和国家自然科学基金的资助。

收稿日期: 1995年12月24日; 收到修改稿日期: 1996年3月26日

秒的脉冲，这样脉冲前沿时间与声学声子寿命相近。由于振放双池受激布里渊散射相位共轭镜能承受比单池更大的泵浦能量，而且其产生的受激布里渊散射相位共轭保真度稳定性也较佳^[9]，本文在具有2 ns 上升前沿的脉冲，其脉冲根部引入缓慢上升的小信号的情况下，采用振放双池受激布里渊散射相位共轭镜来研究所产生稳定的受激布里渊散射转换效率及受激布里渊散射相位共轭保真度。

2 实验光路

实验研究几个纳秒陡上升前沿的激光脉冲产生的受激布里渊散射。首先设法在陡前沿脉冲的根部引入缓慢上升的小信号，通过如图1中虚线框内的复合振荡器提供这种脉冲来实现。图中S为透镜1在池1中焦点与反射镜2间的距离，由全反镜和R₁构成染料调Q振荡器，R₁、R₂为平行的两个4%的反射镜，输出线偏振激光经1/4波片后，变成圆偏振光。这样有两束激光被反馈回振荡器：一束由R₂反射，另一束是由受激布里渊散射池1产生的后向受激布里渊散射激光，这两束光合成经1/4波片，变成与调Q激光偏振方向相垂直的偏振光，再经YAG再放大后，由偏振棱镜耦合输出。受激布里渊散射脉冲的上升前沿比较陡，图2(a)为其经两级钕玻璃放大后的脉冲波形，其半高全宽为7.2 ns，前沿的10%~90%约2 ns，且脉冲前沿根部突变明显。两束激光合并，时间上有一定的相对延迟，其延迟量除产生受激布里渊散射的延迟外，由光路延迟量2S/c决定，c为空气中光速。为保持受激布里渊散射脉冲有陡的上升前沿，而在脉冲根部又引入缓慢上升的小信号，S取值应比较小(本文取S = 10 cm)，图2(b)为合成激光脉冲经两级钕玻璃放大后的脉冲波形，其光束发散角为0.3 mrad(2倍衍射限)。实验中所采用的受激布里渊散射介质为CCl₄，其声学声子寿命比较小(约为1 ns)，有利于几个ns泵浦脉冲产生稳定的受激布里渊散射脉冲^[8]。振荡器调Q激光的谱线宽度为0.016 nm，受激布里渊散射散射激光的频移为0.0166 nm，合成脉冲相当于一宽带激光，在产生受激布里渊散射的过程中，它们可以共用同一个声子场。由于合成脉冲前沿根部

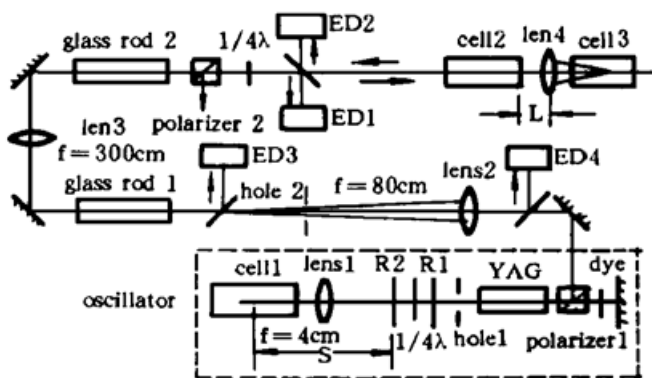


Fig. 1 Schematic of experimental arrangement. R₁, R₂ are all 4% reflectors

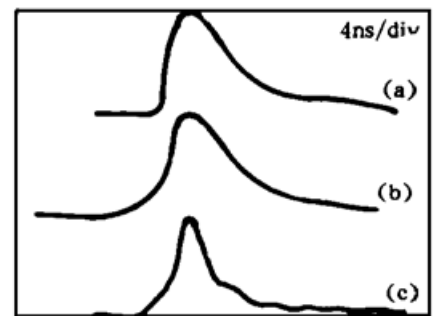


Fig. 2 Oscillator's pulses after two-stage Nd-glass amplifier

(a) without reflector R₂ in Fig. 1, it is only SBS pulse producing in oscillator, (b) compound pulse consisted of Q-switched pulse and SBS pulse, (c) SBS pulse produced by two-cell PC mirror with 30 cm amplifying cell, 5 cm focal length and L = 2 cm for (b) pump pulse

小信号上升缓慢, 有利于介质声子场一开始就建立相位共轭模, 而抑制噪声模, 即使后继的脉冲前沿比较陡, 由于已经建立了相位共轭模, 从而可望提高受激布里渊散射相位共轭保真度及其稳定性。

图1中, 偏振棱镜2和1/4波片组成后向受激布里渊散射的隔离器, 放大池2、振荡池3和透镜4组成振放双池受激布里渊散射相位共轭镜, 根据对振放双池受激布里渊散射相位共轭镜产生的受激布里渊散射脉冲波形的研究, 发现对于图2(b) 这样的泵浦脉冲, 采用80 cm 长的放大池及焦距25 cm 的透镜, 受激布里渊散射脉冲波形畸变很严重; 而采用30 cm 长的放大池及焦距5 cm 的透镜, 在 $L = 2$ cm 下, 受激布里渊散射脉冲前沿形状能基本得到保真, 如图2(c) 所示。所以实验主要采用30 cm 长的放大池和焦距5 cm 的透镜。至于透镜4和放大池2端面的间距为 L , 也可影响受激布里渊散射脉冲波形, 考虑到泵浦脉冲的上升前沿为2 ns, 为使主脉冲在放大池中得到有效的放大, L 值应较小, 实验中取 $L = 2$ cm。

3 实验结果

3.1 受激布里渊散射转换效率及其稳定性

对于图2(b) 的泵浦脉冲, 由图1中能量计1、2测量受激布里渊散射的转换效率, 所采用的放大池长30 cm, 透镜焦距分别为5 cm 和25 cm。图3为其测量结果。对 CCl_4 介质, 采用5 cm 的透镜, 其受激布里渊散射阈值约为0.5 mJ, 而采用25 cm 的透镜, 其受激布里渊散射阈值为12.5 mJ。从图3中看到, 采用5cm 的透镜的受激布里渊散射转换效率的平均值为78.9%, 比采用25 cm 的透镜相应受激布里渊散射转换效率的平均值62.1% 要高, 稳定性则要差些, 但稳定度(定义为测量值均方差与算术平均值之比) 都小于5%。对双池结构, 从受激布里渊散射的脉冲波形(如图2(c)) 可看到, 受激布里渊散射的能量转换大部分是在放大池中实现的, 泵浦激光脉冲的后沿能量由于受激布里渊散射前沿的放大而被抽空, 而到达振荡池焦点的能量只有一小部分, 从而这种振放双池结构能承受更高的泵浦能量。对5 cm 的透镜, 图中泵浦激光能量达到约500倍受激布里渊散射阈值, 而对25 cm 的透镜, 只达到20倍受激布里渊散射阈值。可见, 泵浦激光在较大的超阈值范围内, 受激布里渊散射转换效率稳定度都能保持较高的值。对图2(a) 的泵浦脉冲, 其泵浦脉冲前沿很陡且脉冲根部突变明显, 采用25 cm 的透镜, 在16倍受激布里渊散射阈值泵浦下, 受激布里渊散射的平均转换效率为61%, 而其稳定度在16.2%。可见, 虽然平均转换效率变化不大, 但其稳定性明显变差, 所以快上升前沿泵浦脉冲产生的受激布里渊散射能量是不稳定的; 而在快上升前沿根部引入小的缓慢上升信号后, 可以大大提高受激布里渊散射的能量稳定性。

3.2 受激布里渊散射相位共轭保真度及其稳定性

文献中报道的受激布里渊散射相位共轭保真度^[8] 都将受激布里渊散射分束、聚焦后, 测量透过焦点处小孔的能量比率作为保真度的, 本文考虑到受激布里渊散射是以多程放大的形

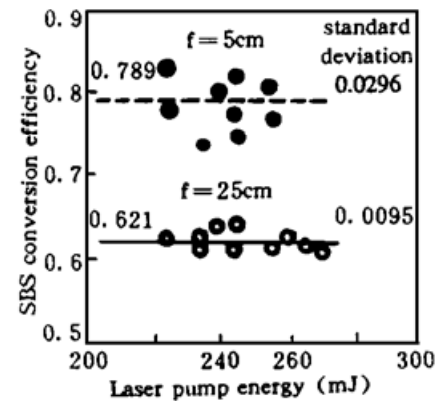


Fig. 3 SBS conversion efficiency to pump energy with two-cell PC mirror (with 30 cm amplifying cell, 25 cm and 5 cm focal length, $L = 2$ cm) pumped by Fig. 2(b) pulse

式应用在激光器中的, 所以将振放双池受激布里渊散射相位共轭镜和激光放大器作为一个整体来考察受激布里渊散射的相位变化。在图1的光路中, 取走偏振棱镜2, 由能量计3、4测量受激布里渊散射透过小孔的能量比率作为受激布里渊散射相位共轭保真度。透镜2、3是一对扩束镜, 透镜2的焦距为0.8 m, 焦点处小孔直径为1 mm, 振荡器光束能量约90%透过小孔。当激光泵浦功率在超过受激布里渊散射阈值很多时, 通常在受激布里渊散射产生的过程中伴随其它非线性过程(比如光学击穿、自聚焦、受激喇曼散射等)的发生, 而这些非线性过程会影响受激布里渊散射的相位共轭保真度。对 CCl₄这种介质, 很容易发生光学击穿。在图1的光路中, 受激布里渊散射放大池长30 cm、聚焦透镜焦距为5 cm, 在钨玻璃放大器不工作, 仅振荡器输出的能量, 在受激布里渊散射振荡池焦点处就可看到有弱的击穿现象, 而此时振荡器输出经一系列光学元件的衰减后, 在进入受激布里渊散射相位共轭镜前的激光能量不到5 mJ, 可见 CCl₄介质的击穿阈值是很低的。实验中分2.6 kV、2.8 kV、3.0 kV 三挡改变钨玻璃放大器氙灯充电电压, 以改变泵浦激光能量, 表1列出了所测受激布里渊散射在通过小孔前后的能量及所算得的受激布里渊散射保真度。从表1中看到, 当放大器氙灯充电电压不超过2.8 kV, 反馈回小孔的能量小于100 mJ, 此时透过小孔的能量比率较大, 保真度在70%附近, 测量均方差小于4%, 稳定度小于5%。当放大器氙灯充电电压为3 kV时, 反馈回小孔的能量在200 mJ附近, 此时在小孔周围看到较强的火花, 所产生的等离子体对激光

Table 1. SBS phase-conjugation fidelity changes with pumping laser energy

pump energy (mJ)	item	measured value										mean	standard deviation
75 mJ± 10% (Xe: 2.6 kV)	SBS energy befor hole (mJ)	38.3	33.3	56.2	38.3	43.4	43.4	46	48.5				
	SBS energy after hole (mJ)	27.6	23.4	38.9	26	29.4	31.1	31.1	33.7				
	fidelity (%)	72.7	70.3	69.2	67.8	67.7	71.7	67.7	69.5	69.5	1.7		
100 mJ± 10% (Xe: 2.8 kV)	SBS energy befor hole (mJ)	109.8	117.5	86.9	97.1	76.7	74.1	81.8	112.4	86.9	84.3		
	SBS energy after hole (mJ)	72.6	81.3	58.8	64	58.8	50.2	57.1	72.6	57.1	57.1		
	fidelity (%)	66.1	69.2	67.7	65.9	76.7	67.7	69.8	64.6	65.7	67.7	68.1	3.2
150 mJ± 10% (Xe: 3.0 kV)	SBS energy befor hole (mJ)	114.6	224.8	235.1	222.3	235.1	211.2	219.7	207	219.7	214.6		
	SBS energy after hole (mJ)	55.8	111.3	111.4	100.9	123.4	107.1	104.6	97.5	113.1	107.9		
	fidelity (%)	48.7	49.5	47.4	52.5	50.7	47.6	47.1	51.5	50.3	49.1	2.1	
150 mJ± 10% (Xe: 3.0 kV)	SBS energy befor hole (mJ)	199.3	245.3	235.1	237.6	219.7	219.7						
	SBS energy after hole (mJ)	114.8	139.1	139.2	139	125.2	128.7						
	fidelity (%)	57.6	56.7	59.2	58.5	57	58.6					57.9	0.9

有屏闭作用,即所谓的堵孔现象,使实测的保真度变小,但其稳定度仍小于5%;另外在小孔周围焦线区域可看到空气击穿,这也降低了所测的保真度。为减小堵孔现象,在小孔周围表面用透明薄膜覆盖,这样堵孔现象明显减小,表中第四组就是其测得的结果,可以看到保真度明显提高。

实验中小孔的大小刚好使振荡器激光透过。若小孔稍偏移,透过激光发生衍射,实验测得的保真度明显下降,可见衍射对保真度是有影响的。由于光学元件质量问题,在双程放大中,总存在一定的衍射,所以实验所测的受激布里渊散射脉冲的保真度比文献报道的测量结果小些。在小能量(150倍和200倍受激布里渊散射阈值泵浦能量)工作时获得了70%左右的保真度。实验采用的 CCl_4 介质是很容易击穿的介质,当泵浦激光10 mJ时,经一系列光学元件后,振荡池焦点处能量已不到5 mJ,也产生击穿,而当氙灯电压在2.8 kV,泵浦激光能量提高了近20倍,所以在受激布里渊散射振荡器焦点处存在较强的击穿时,仍能确保较高的相位共轭保真度,且其稳定度在5%以内。在泵浦更强时,由于存在堵孔及空气击穿现象,从而降低了受激布里渊散射的测量保真度(但稳定度仍在5%内),这从小孔周围用透明薄膜覆盖后所测的结果得以证明,而空气击穿现象可以用空间滤波器得以改善。

3.3 受激布里渊散射脉冲波形稳定性

对双池结构,从图2(c)的受激布里渊散射脉冲波形可看出,振荡池产生的受激布里渊散射种子脉冲(尤其是脉冲前沿)在放大池中有较大的放大,其能量转换大部分是在放大池中实现的,泵浦激光脉冲的后沿能量由于受激布里渊散射前沿的放大而被抽空,从而在脉冲峰后约4 ns处呈现一台阶(如图2(c))。由于双池系统中透镜焦距 $f = 5 \text{ cm}$ 及 $L = 2 \text{ cm}$,振荡池产生的受激布里渊散射种子脉冲前沿进入放大池只需约0.3 ns,考虑到介质声学声子的建立时间约1 ns,因而其在放大池中基本能与泵浦脉冲的峰值区域相遇,从而脉冲前沿放大较有效。本文实验中采用快响应PIN光电二极管和Teck 7834示波器(总体响应时间约1 ns)观测激光脉冲,从图3看到激光器输出激光能量有约10%的起伏,在同时监测泵浦激光能量,进行多次观测受激布里渊散射脉冲波形,看到当泵浦脉冲能量较接近时,受激布里渊散射脉冲形状基本不变;而泵浦能量增大或减小,受激布里渊散射脉冲峰也随之增强或减弱,表现出峰值强度与后沿台阶强度之比随之加大或减小;而受激布里渊散射脉宽也有约0.2 ns的起伏。

结 论 采用双池受激布里渊散射结构,能提高泵浦激光能量承受能力,对于上升前沿时间接近介质声学声子寿命的泵浦脉冲,在其前沿根部引入缓慢上升的小信号后,即使泵浦激光能量高达受激布里渊散射阈值500倍,仍能获得高的、稳定的受激布里渊散射,其转换效率最高达到83%,稳定度在3.7%。将受激布里渊散射双程放大作为一个整体,文中考察了这种泵浦脉冲产生的受激布里渊散射相位共轭保真度。结果表明,在200倍受激布里渊散射阈值能量泵浦下,虽然焦点处有较强的击穿,但受激布里渊散射保真度能基本维持在70%左右,其稳定度在5%以内;当进一步提高泵浦时,反馈受激布里渊散射能量增大,产生堵孔现象,降低了保真度的测量值,但其稳定度不变。可见,在陡上升前沿根部引入缓慢上升的小信号,能改善其产生的受激布里渊散射稳定性。

参 考 文 献

- [1] R. Mays, R. J. Lysiak, Observations of wavefront reproduction stimulated Brillouin scattering as a function of pump power and waveguide dimensions. *Opt. Commun.*, 1980, **32**(4) ·334~ 338
- [2] L. P. Schelonka, The fidelity of stimulated Brillouin scattering with weak aberrations. *Opt. Commun.*, 1987, **64**(3) ·293~ 297
- [3] L. P. Schelonka, C. M. Clayton, Effect of focal intensity on stimulated Brillouin scattering reflectivity and fidelity. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(1) ·42~ 44
- [4] V. E. Yashin, V. I. Kryzhanovskii, V. A. Serebryskov, Reversal of the wavefront of nanosecond and subnanosecond light pulses in stimulated Brillouin scattering. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1982, **12**(8) ·1086~ 1088
- [5] A. A. Betin, A. F. Vasil'ev, O. V. Kulagin *et al.*, Phase conjugation in nonstationary stimulated Brillouin scattering of focused beams. *Sov. Phys. JEPT*, 1985, **62**(3) ·468~ 476
- [6] R. H. Lehmborg, Numerical study of phase conjugation in stimulated Backscatter with pump depletion. *Opt. Commun.*, 1982, **43**(5) ·369~ 373
- [7] I. Yu. Anikeev, I. G. Zubarev, S. I. Mikhailov, Influence of saturation on the quality of wavefront reversal in the case of stimulated scattering of spatially inhomogeneous pump radiation. *Sov. J. Quant. Electron.*, 1986, **16**(1) ·88~ 91
- [8] C. B. Dane, W. A. Neuman, L. A. Hackel, Pulse-shape dependence of stimulated Brillouin-scattering phase-conjugation fidelity for high input energies. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(18) ·1271~ 1273
- [9] 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

A Study on Stability of Stimulated Brillouin Scattering Pumped by a Pulse with Steep Leading Edge

He Weiming Lu Zhiwei Wang Qi Ma Zuguang

(*Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001*)

(Received 24 December 1995; revised 26 March 1996)

Abstract The stability of stimulated Brillouin scattering (SBS) conversion efficiency and phase-conjugation (PC) fidelity are mainly depend on the leading edge of pump pulse. If the rise time of the leading edge of the pump pulse is near to the acoustic phonon lifetime of SBS medium and pump energy is well over the SBS threshold, the SBS PC fidelity will become very unstable. For pump pulse with 2 ns leading edge and CCl₄ medium with about 1 ns acoustic phonon lifetime, when introduced a small slow rising signal at the front foot of the pump pulse's leading edge, a stable SBS produced by two-cell SBS PC mirror is obtained even for pump pulse energy exceeding 500 times SBS threshold. The fluctuation of the SBS conversion efficiency is within 4%, and that of the PC fidelity is within 5%.

Key words stimulated Brillouin scattering, phase-conjugation mirror, phase-conjugation fidelity.