

脉宽可调 YAG 激光器稳定性的实验研究*

刘 莉 吕志伟 何伟明 王 骐 马祖光

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所 哈尔滨 150001)

提要 对脉冲 Nd·YAG 激光器抽运的双池受激布里渊散射(SBS)相位共轭镜进行了实验研究,将相位共轭镜后向反射光束馈入 YAG 放大级,经放大级放大,由偏振片耦合输出的激光束具有高质量、脉宽可调的特点,远场发散角接近 1 倍衍射极限。同时研究了远场发散角和输出能量稳定性随抽运能量及双池间距的变化关系,通过选用最佳抽运能量,远场发散角及激光器总体输出能量的波动性都可以控制在 5% 以内。

关键词 受激布里渊散射,相位共轭镜,脉宽可调,YAG 激光器,稳定性

1 引 言

在过去的几十年中,受激布里渊散射(SBS)一直是人们进行广泛实验和理论研究的重要课题。一方面,SBS 相位共轭镜具有实时产生相位共轭波比较理想地修正任意波前畸变的独特能力,将 SBS 相位共轭镜应用到强激光系统中进行光学相位共轭,消除光学元件产生的波前畸变,改善激光系统的光束质量^[1],或在主谐振腔功率放大级(MOPA)上利用 SBS 相位共轭镜进行再生放大或二次放大等^[2~4]已成为一种重要的光学相位共轭技术。另一方面,利用受激布里渊散射脉冲压缩特性,可以获得高强度短脉冲激光,在红外、紫外、可见谱区已经实现了有效的脉冲压缩^[5],脉宽最窄可以压缩到 120 ps^[6]。在许多实际应用如激光打靶、光谱分析、非线性光学响应测量中均要求激光器的脉宽可变。国外有三个工作小组分别报道了用 Nd·YAG 激光器和 KrF 激光器抽运双池 SBS 相位共轭镜^[7]或单池 SBS 相位共轭镜^[8,9]获得了脉宽可变的激光输出。在我们以前的工作中^[10,11]已经报道了脉冲 Nd·YAG 激光器抽运的双池 SBS 系统中,通过改变双池间距获得了脉宽连续可调的优质激光束。对实际应用来说,这种脉宽可调激光器的稳定性是一个十分重要的因素。

2 实验装置

图 1 为实验光路,平面全反镜 1 和未镀膜的玻璃平片 6(反射率 8%)构成 Nd·YAG 振荡级的谐振腔,由染料片 2 调 Q,3 为起偏偏振片,小孔光阑 5 的直径为 0.2 cm。偏振片 7 的光轴方向与偏振片 3 相同,Nd·YAG 放大级 8 出射的抽运光脉宽为 11~12 ns,通过改变 YAG 放

* 国家自然科学基金及国家高技术惯性约束聚变主题资助项目。

收稿日期: 1999-03-29; 收到修改稿日期: 1999-07-11

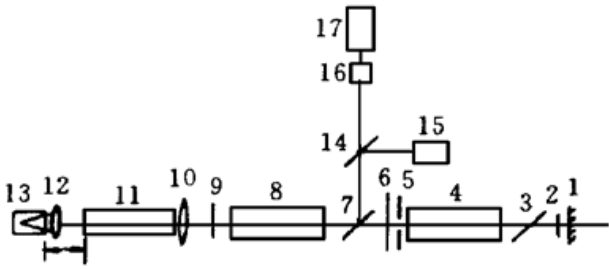


图 1 实验装置光路图

Fig. 1 Experimental setup

1, 6: cavity mirror; 2: dye film; 3, 7: polarizer; 4, 8: YAG rod;
9: quarter wave plate; 10, 12: lens; 11: SBS amplifier cell; 13:
SBS generator cell; 14: beam splitter; 15: energy meter
ED200; 16: PIN photodiode; 17: digital oscilloscope
TDS684A

大级的 Xe 灯放电电压可以调节抽运能量, 抽运光的偏振方向为垂直偏振, 经四分之一波片后变成圆偏振光, 进入双池 SBS 系统, 它由 SBS 放大池 11(长 80 cm), 聚焦透镜 12(焦距为 5 cm), SBS 产生池 13(长 10 cm) 组成。聚焦透镜 12 紧挨产生池放置, 由相位共轭镜返回的受激布里渊散射激光经四分之一波片后变为水平偏振光, 再次通过 YAG 放大级 8, 对放大级的能量进一步提取, 由偏振片 7 耦合输出, 输出能量由能量计 ED200 探测, 快响应 PIN 光电二极管 16(响应时间约 1 ns) 探测其脉冲波形, 并由数字示波器 TDS684A 记录。

3 实验结果与讨论

实验中选取四氯化碳作为受激布里渊散射介质, 它具有短的声子寿命, 约为 0.6 ns, 布里渊增益系数 $g = 6 \text{ cm/GW}$ 。为使放大池对产生池产生的受激布里渊散射有足够的放大, 在放大池前放置一个长焦距透镜 10, 对抽运光缩束, 以增强放大池中抽运光的强度, 且使放大池中的抽运光强度刚好在 SBS 阈值之下, 为此我们选用了焦距为 150cm 的透镜作为缩束镜。

为简便起见, 将经 SBS 相位共轭镜反射, YAG 放大级二次放大, 由偏振片 7 耦合输出的脉冲即简称为 SBS 脉冲。图 2 (a) ~ (e) 为抽运能量 28 mJ 时, 不同双池间距下的 SBS 脉冲波形。SBS 脉宽随着双池间距的增大而增大, 脉宽在 2.5~ 10 ns 范围内可变。同时测量了其他抽运能量下, SBS 脉宽随双池间距的变化关系。SBS 脉宽的变化与抽运能量 28 mJ 的情况相似, 对于 5.7 mJ 的抽运能量, 脉宽在 2.8~ 4.8 ns 可调; 对于 13 mJ 的抽运能量, 脉宽在 3~ 7.6 ns 可调; 对于 22 mJ 的抽运能量, 脉宽在 2.8~ 9 ns 可调。因此受激布里渊散射脉宽可调范围与抽运能量有关, 通过增加抽运能量, 能够获得更大的脉宽可调范围, 最大的受激布里渊散射脉宽可以达到略小于抽运脉宽。以上的实验结果与我们以前的工作是一致的。关于 SBS 脉宽随双池间距的变化及脉宽可调范围对抽运能量的依赖关系的详细理论解释已在我们以前的工作中给出^[11], 这里不再阐述。

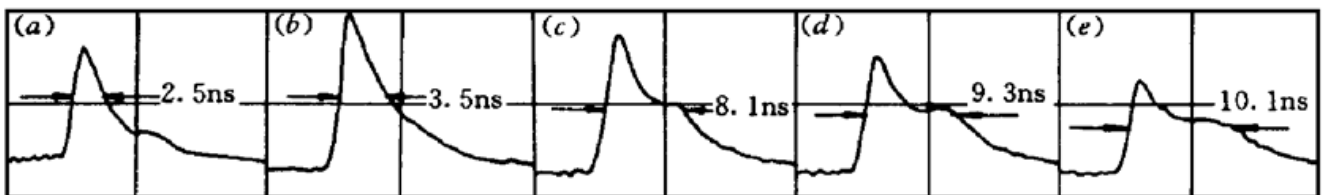


图 2 输出脉冲的时间曲线

Fig. 2 Temporal profiles of output pulses

(a) $L = 10 \text{ cm}$; (b) $L = 40 \text{ cm}$; (c) $L = 70 \text{ cm}$; (d) $L = 100 \text{ cm}$; (e) $L = 115 \text{ cm}$

为获得稳定的能量输出, 寻找到最佳的抽运条件, 我们测量了不同抽运能量下, 输出能量及其波动性(输出能量的标准偏差与平均输出能量之比) 随双池间距的变化关系(对于每一双

池间距位置, 测量次数超过 40 次), 如图 3, 4 所示。由图 3 可以看出, 随着抽运能量的增高, 受激布里渊散射激光输出能量很快增大。这一方面是由于抽运能量的增高导致受激布里渊散射反射率增大, 另一方面是由于放大级 Xe 灯放电电压的增大, 将使放大级 YAG 棒中有更多的粒子数布居在上能级, 受激布里渊散射光二次经过 Nd·YAG 放大级时对其有更大的能量提取造成的。而在同一抽运能量条件下, 输出能量随双池间距的增大改变很小, 只有在双池间距较大时 (> 90 cm), 输出能量才有所下降。这是由两个因素导致的: (1) 产生池中出射的受激布里渊散射种子光与抽运光相向传播, 在 SBS 放大池中与入射脉冲碰撞, 抽空抽运能量, 产生受激布里渊散射放大。在较大的双池间距处, 产生池出射的受激布里渊散射种子光与入射脉冲的尾部相遇, 被其放大, 抽运脉冲中有很大部分能量未被抽空, 对种子光的放大减弱, 导致输出能量下降; (2) 在较大的双池间距处, SBS 相位共轭镜反射的光束经 YAG 放大级再次放大时, 不对应于 Xe 灯的最佳放电时间而造成放大级对其放大减小。改变双池间距 SBS 输出能量几乎保持不变的特性对于利用 SBS 相位共轭镜获得脉宽可变的激光束具有实际应用意义。抽运激光本身的输出能量存在一定的波动性(实验中所用的 Nd·YAG 激光器其输出能量的波动性约为 5%), 并且产生池中的 SBS 种子光起源于噪声, 输出能量上的波动是不可避免的。抽运能量为 5.7 mJ 时, 输出能量表现出很大的波动性, 在双池间距 10~ 100 cm 的范围, 波动性均在 12% 以上(如图 4 所示)。随着抽运能量的增大, 输出能量的波动性逐渐减小, 当抽运能量为 22 mJ 时, 在双池间距 10~ 100 cm 范围, 输出能量的波动性小于 5%。

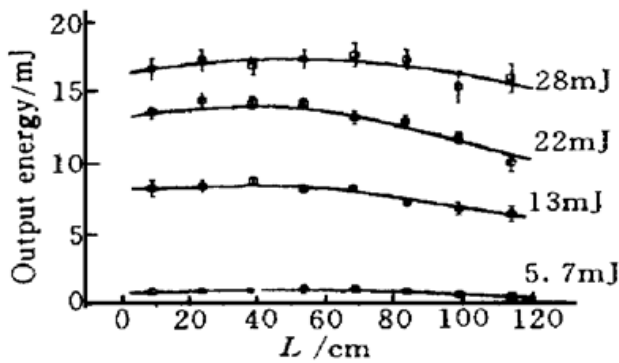


图 3 抽运能量不同时输出能量与 L 的关系
Fig. 3 Output energy versus L at different pump energy

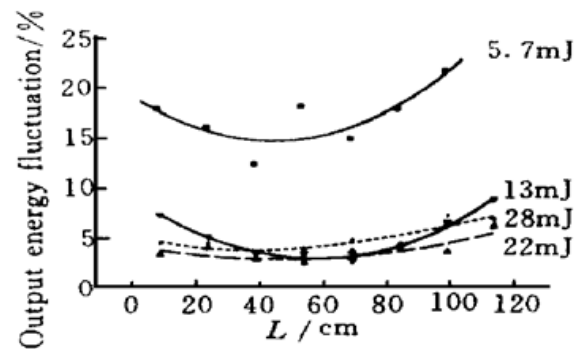


图 4 抽运能量不同时输出能量涨落随 L 的变化
Fig. 4 Fluctuation of output energy versus L at different pump energy

因此对于双池 SBS 系统, 适当地增加抽运能量, 可以有效地减小输出能量上的波动。对于 22 mJ 的抽运能量, 在 10~ 80 cm 的双池间距范围, 输出能量非常稳定, 其波动性要小于抽运能量的波动性。可见对于适当的抽运能量, SBS 相位共轭镜有抑制抽运能量波动的作用。然而, 在实验中发现, 继续增加抽运能量时, 输出能量的波动性反而有所增大。这是由于当激光抽运功率密度超过阈值很多倍时, 在受激布里渊散射产生的过程中伴随着其他非线性过程(如光学击穿、自聚焦、受激拉曼散射)的发生, 而这些非线性过程将影响输出能量的稳定性。作为 SBS 增益介质的四氯化碳的击穿阈值较低, 当抽运能量超过 20 mJ 时已经明显地看到产生池中的击穿亮线。在实验中, 我们对 YAG 放大级二次放大后输出的受激布里渊散射激光的远场发散角进行了测量。在图 1 光路中, 取走分束镜 14, 换上激光束列阵成像相机, 用紫外示波纸接收激光的远场空间分布。对于所测激光的远场空间分布, 一般选取激光列阵图中 85% 能量处的

发散角为测量值。在图 1 光路输入抽运光的发散角为 0.6 mrad, 约 1.7 倍衍射极限。图 5 (a) ~ (c) 为双池间距 10 cm, 40 cm, 100 cm 时, 多次测得的输出激光束能量远场空间分布, 发散角分别为 0.37 mrad, 0.33 mrad, 0.35 mrad, 接近 1 倍衍射极限。因此利用输出 SBS 相位共轭镜对 YAG 放大级出射的光束进行光学畸变补偿后, 光束质量有了明显的改善。另外, 从紫外示波纸接收的光强分布来看, SBS 输出激光的光束空间强度较放大级出射的光束更为均匀。表 1 给出不同双池间距下 SBS 远场发散角及其标准方差以及波动性的测量值。双池间距为 40 cm 处, SBS 远场发散角的波动性最小, 在 10 cm 和 100 cm 处, 远场发散角的波动性略有增大。但在任何双池间距处, 受激布里渊散射激光的远场发散角的波动性均在 5% 以内。

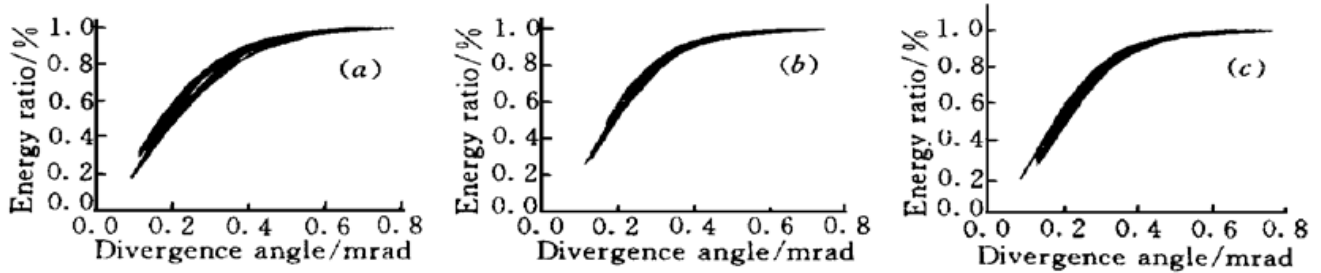


图 5 SBS 输出光束的发散角

Fig. 5 Divergence angle of SBS output beam

(a) $L = 10$ cm; (b) $L = 40$ cm; (c) $L = 100$ cm

表 1 SBS 输出光束发散角及其涨落

Table 1 SBS output beam divergence and its fluctuation

L / cm	Divergence angle of SBS output beam / mrad	Mean / mrad	Standard deviation	Fluctuation
10	0.362 0.368 0.348 0.347 0.360 0.375 0.404 0.407 0.343 0.386 0.379 0.374 0.358 0.383	0.37	0.0187	5.1%
40	0.332 0.328 0.321 0.333 0.343 0.332 0.330 0.346 0.332 0.315 0.312 0.316 0.326 0.326 0.344	0.33	0.01	3.0%
100	0.358 0.340 0.354 0.350 0.364 0.341 0.360 0.341 0.323 0.337 0.344 0.361 0.346 0.325 0.344 0.347	0.35	0.011	3.3%

4 结 论

利用双池 SBS 相位共轭镜对 Nd:YAG 激光器放大级进行相位共轭补偿, 获得了近 1 倍衍射极限的高质量脉宽可调激光束, 最佳的抽运能量为 22 mJ, 此时输出能量约 16 mJ, 脉宽可调范围 2.8~9 ns, 远场发散角及输出能量的波动性均小于 5%。为获得更大的脉宽可调范围及更大的输出能量, 可以用增大抽运脉宽及对输出激光进行逐级放大的方法来解决。因此这种带有 SBS 相位共轭镜的脉冲 YAG 激光器的设计除具有短脉冲(可获得 2~3 ns 的短脉冲, 与削波法比, 其调整简单, 造价低)、脉宽可调(脉宽从 2.5 ns 至抽运脉宽连续可调)、优质光(可获得近 1 倍衍射限的高质量光束)等优点, 还具有高稳定性的特点, 通过选用最佳抽运能量, 可以得到输出能量及远场发散角都很稳定的激光光束。

参 考 文 献

- 1 V. F. Efimkov, I. G. Zubarev, A. V. Kotov *et al.*. Investigation of systems for obtaining short high-power pulses by wavefront reversal of the radiation in a stimulated Brillouin scattering mirror. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1980, **10**(2): 211~ 214
- 2 Hans J. Eichler, Andreas Haase, Ralf Menzel. 100-Watt average output power 1.2 diffraction limited beam from pulsed neodymium single-rod amplifier with SBS phase conjugation. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(8): 1265~ 1269
- 3 C. B. Dane, I. E. Zapata, W. A. Neuman *et al.*. Design and operation of a 150 W near diffraction-limited laser amplifier with SBS wavefront Correction. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(1): 148 ~ 163
- 4 S. Seidel. Improvement of extraction efficiency by regenerative amplification in an Nd ·YAG-MOPA with a phase-conjugating SBS cell. *Opt. Quantum Electron.*, 1995, **27**(6): 625~ 632
- 5 C. Brent Dane, William A. Neuman, Lloyd A. Hackel. High-energy SBS pulse compression. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(8): 1907~ 1915
- 6 R. Buzelis, A. Dement'ev, E. Kosenko. Numerical analysis and experimental investigation of beam quality of SBS-compressor with multipass Nd ·YAG amplifier. *SPIE*, 1996, **2772**: 158~ 169
- 7 Stephan Schiemann, Wim Ubachs, Wim Hogervorst. Efficient temporal compression of coherent nanosecond pulses in a compact SBS generator-amplifier Setup. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(3): 358~ 366
- 8 Norman A. Kurnit, Scott J. Thomas. Application of a phase-conjugate Brillouin mirror to generation of high-quality variable-duration KrF pulses. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1989, **25**(3): 421~ 429
- 9 Patrick Klovekorn, Jesper Munch. Variable stimulated Brillouin scattering pulse compressor for nonlinear optical measurements. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(24): 5913~ 5917
- 10 He Weiming, Lu Zhiwei, Wang Qi *et al.*. Two-cell stimulated-Brillouin-scattering phase-conjugated mirror compressing pulses width of Q-switched YAG oscillator. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(4): 450~ 453 (in Chinese)
- 11 Lu Zhiwei, Liu Li, He Weiming *et al.*. Generation of high-quality tunable-duration pulses by two-cell SBS phase conjugating mirror. *Acta Optica Sinica* (光学学报) (accepted, in Chinese)

Experimental Investigation on the Stability of YAG Laser with Tunable-pulsewidth

Liu Li Lü Zhiwei He Weiming Wang Qi Ma Zuguang

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

Abstract A two-cell SBS phase-conjugating mirror pumped by pulsed Nd ·YAG laser was experimentally investigated. After returned to YAG amplifier and coupled out by a polariser, SBS output beam had the characteristics of duration tunability and good quality with near-diffraction-limited far-field divergence angle. The stability on SBS output energy and far-field divergence angle with the change of pump energy and separation between SBS generator and amplifier cells was also studied. By choosing pump energy, the fluctuation on SBS output energy and far-field divergence angle could be controlled within 5%.

Key words stimulated Brillouin scattering (SBS), phase-conjugating mirror, tunable pulsewidth, YAG laser, stability