

窄脉冲激光泵浦双池受激布里渊 散射系统研究*

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)

提要 对于窄脉冲激光泵浦双池受激布里渊散射(SBS)系统,其泵浦脉冲宽度和前沿形状以及振放大池系统的参数,都将影响到SBS的脉冲强度与转换效率。实验中采用了两个具有不同前沿的窄脉冲先后相继泵浦双池SBS系统。通过改变SBS放大池和聚焦透镜的焦距,观察到所产生的两个SBS脉冲具有不同的转换效率。利用振荡池产生的SBS调制种子光在放大池中的行波放大对此结果作了分析,由此提供了一种设计双池SBS系统参数的方法。

关键词 受激布里渊散射,双放大池,行波放大

1 引言

受激布里渊散射(SBS)的相位复共轭(PC)特性对于高功率激光器而言是很有价值的^[1],一方面它可以改善激光光束质量,另一方面可以降低激光器大口径光学元件的光学精度,从而大幅度降低器件造价。由于振放大池SBS系统产生的SBS具有高的稳定的相位共轭保真度,且此结构能承受较高的泵浦激光功率^[2~6],所以振放大池SBS系统是可实际应用的结构,近年来受到人们的关注^[6,7]。为获得比较高的且稳定的SBS转换效率,一般泵浦脉冲宽度远大于SBS介质的声子寿命,即所谓的稳态。但对几个纳秒量级窄泵浦激光脉冲,在实验中我们发现,其脉冲宽度及前沿形状以及振放大池系统的参数,都将影响到SBS的脉冲强度与转换效率。我们采用两个具有不同前沿的窄脉冲先后相继泵浦双池SBS系统,通过改变SBS放大池和聚焦透镜的焦距,同时观察了所产生的两个SBS脉冲,并就SBS种子光行波放大对此作了分析,进而对窄泵浦脉冲在设计振放大池系统参数时提供一种方法。

2 实验光路及结果

图1为实验光路,振荡器有两个脉冲迭加输出,其一为4%的反射镜 R_2 (R_2 与调Q振荡器输出镜 R_1 平行)所反射的调Q脉冲,其二为SBS池1产生的SBS脉冲,这两个脉冲经四分之一波片后,由偏振棱镜1耦合输出,并经两级钽玻璃放大器放大后,泵浦由池2、3及透镜4组成的振放大池系统。SBS池的介质均采用 CCl_4 ,其声子寿命 τ_s 较短,约为1ns;偏振棱镜2和

* 本文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。

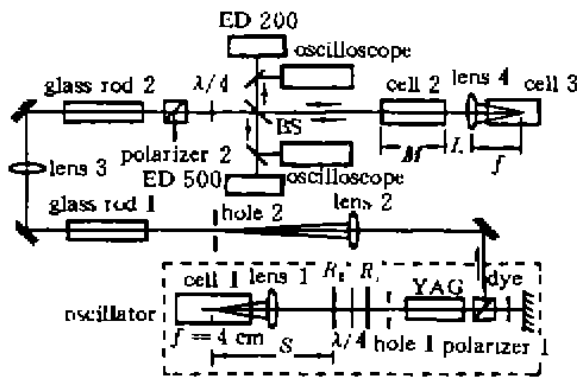


图 1 实验装置示意图。R₁, R₂ 为 4% 反射镜。

Fig. 1 Schematic of the experimental arrangement.

R₁, R₂ are 4% reflectors

四分之一波片组成后向 SBS 的隔离器, 振放双池系统产生的后向 SBS 脉冲由偏振棱镜 2 耦合输出, 输入泵浦脉冲和输出 SBS 脉冲测量信号由分束镜 BS 取样; 透镜 2, 3 为扩束透镜。透镜 1 的焦点到 R₂ 的间距 S 决定两个脉冲在时间上分开的程度, 实验中取 S = 63 cm, 图 2(a) 为激光器输出的合成泵浦脉冲, 其能量约为 240 mJ, 对单独脉冲的形状进行拟合, 调 Q 脉冲 A₁ 和 SBS 脉冲 B₁ 的面积比 (代表能量比) 约为 1 : 1.37, 脉冲 A₁ 的半高宽为 8.7 ns, 频带宽为 0.016 nm, 脉冲 B₁ 的半高宽为 6 ns, 其 10~90% 的前沿为 2 ns, 与脉冲 A₁ 的中心频移 (即 SBS 的频移) 为 0.0166 nm, 两脉冲的频率是不重叠的。在脉冲形状上, 这两个脉冲的区别在于前沿, 由这两个脉冲相继泵浦振放双池系统, 可同时观察其产生的 SBS 脉冲形状及强度。对于透镜 4 与放大池末端

图 2 泵浦脉冲和不同放大池长及不同透镜焦距下的 SBS 脉冲

(a) 泵浦脉冲; (b), (c), (d) 放大池长分别为 30 cm, 30 cm 和 80 cm 及透镜焦距分别为 5 cm, 25 cm 及 25 cm 时的 SBS 脉冲

Fig. 2 Pump and SBS pulses with different amplifier-cell-lengths and focal-lengths

(a) pump pulse, (b), (c) and (d) SBS pulses with 30 cm, 30 cm and 80 cm amplifier-cell-lengths and 5 cm, 25 cm and 25 cm focal-lengths respectively

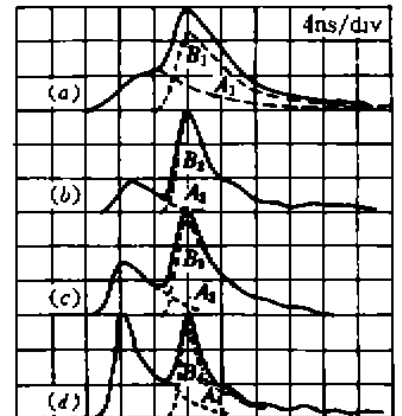


表 1 SBS 放大池长和透镜焦距不同时的 SBS 脉冲转换效率

Table 1 SBS pulses efficiency for different SBS amplifier-lengths and focal-lengths

Pulse order	Amplifier-cell length (cm)	Focal-length (cm)	Total efficiency (%)	SBS pulse area S _A : S _B	P _A efficiency (%)	P _B efficiency (%)
Fig. 2 (b)	30	5	70	1 : 2.96	42	90
Fig. 2 (c)	30	25	70	1 : 1.77	60	78
Fig. 2 (d)	80	25	56	1 : 0.68	79	39

的间距 L, 考虑到泵浦脉冲为窄脉冲, L 取 2 cm。图 2 中脉冲 (b) ~ (d) 为振放双池系统在不同放大池长及不同透镜焦距下产生的 SBS 脉冲, 同样我们对单脉冲的形状作了拟合。表 1 列出了图 2(b) ~ (d) 所采用放大池长和透镜焦长以及两个 SBS 脉冲面积比和转换效率, 表中 S_A 和 S_B 分别代表图 2(b) ~ (d) 中 SBS 脉冲 A₂, A₃, A₄ 和 B₂, B₃, B₄。考虑到拟合脉冲 A₁, B₁ 的能量比, 合成泵浦脉冲中拟合脉冲 A₁ 和 B₁ 的能量分别约为 100 mJ 和 140 mJ, 由于振放双池系统中各光学元件表面的反射及 SBS 介质的吸收, 各拟合脉冲的泵浦脉冲峰值功率接近文献 [4] 所采用的激光泵浦功率, 由于 CCl₄ 介质的光学击穿阈值较低, 所以实验中可以观察到在产生 SBS 的同时, 在 SBS 振荡池中有一定的击穿现象。表 1 中对于 80 cm 的放大池, 总体转换效率偏低也是

由于 CCl_4 介质对 $1.06 \mu\text{m}$ 激光的吸收所造成的,这在下面的分析中将进一步阐述。从表 1 和图 2 中看到对于脉宽为 6 ns 的陡前沿泵浦脉冲 B_1 ,放大池的长度和透镜焦距的增大使其 SBS 脉冲的强度及转换效率有明显的下降;而对于 8.7 ns 的调 Q 脉冲 A_1 ,却表现出相反的结果。脉冲 B_1 产生的 SBS 转换效率在图 2 (b) 中是脉冲 A_1 的两倍多,而在图 2 (d) 中却只有 A_1 脉冲的一半。

3 振放双池系统 SBS 行波放大的分析

文献[4]在实验和理论上对振放双池系统作了详细的分析,指出振荡池产生的 SBS 种子光,在反馈进入放大池后与泵浦光相遇而得到耦合放大,从而也使泵浦激光的能量被抽空,进而又影响到种子光的强度,这一过程呈现一定的周期性,对半高宽 12 ns 的泵浦脉冲,文献[4]报道在实验上观察到振荡池产生的 SBS 脉冲强度存在明显的调制,并在理论上对此作了模拟,指出其调制周期取决于光信号在振放双池系统中往返的时间以及声子场衰减和建立的时间。对于 $6 \sim 8.7 \text{ ns}$ 的泵浦窄脉冲,下面我们结合文献[4]的理论,作放大池中 SBS 种子光行波放大的分析。

由于振荡池产生的 SBS 种子光存在较大的调制,它势必会影响到其在放大池中的放大,为此首先我们作出池间由振荡池产生的 SBS 种子光调制脉冲,若透镜 4 紧靠振荡池,其调制子脉冲宽度为 $2 \times (L + n \times f)$ (其值若小于 τ_B ,则取 τ_B),在此期间放大池中的泵浦激光没被 SBS 种子光所抽空;谷宽为 $2 \times (n \times M + L + n \times f)$,在此期间放大池中的泵浦激光不同程度地被 SBS 种子光所抽空。其中 M 为放大池的长度, n 为介质的折射率。若 $n = 1.5$,那么对应图 2 (b) ~ (d) 的双池系统,振荡池产生的 SBS 调制种子脉冲分别对应于图 3 (b) ~ (d) (图中曲线为根据调制周期,依照文献[4]模拟计算的结果画出,反应调制周期,不反应真实强度),图 3 (a) 中脉冲 A, B 分别对应图 2 (a) 中拟合脉冲 A_1, B_1 。

调制种子光在放大池中的放大,有两点值得注意,一是调制子脉冲在放大池中与泵浦脉冲的峰值附近相遇,能得到最有效的放大;二是相遇区域如处于放大池的前端附近,那么放大后 SBS 的吸收较小,虽然在很多介质中 CCl_4 对 $1.06 \mu\text{m}$ 波长的吸收是较小的 (CCl_4 的吸收系数约为 0.003 cm^{-1}),但对长放大池来说,吸收仍然是很明显的。

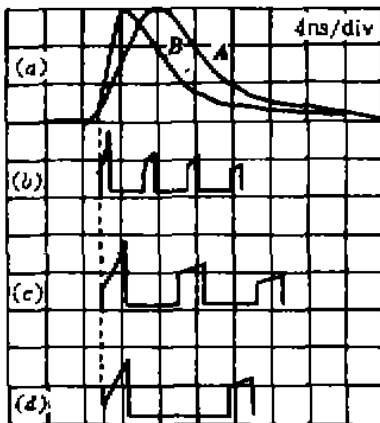


图 3 池间受激斯托克斯辐射的泵浦脉冲和时间曲线

(a) 泵浦脉冲相当于图 2 (a), (b), (c) 和斯托克斯时间曲线相当于图 2 (b), (c) 和 (d) 的双池 SBS 系统

Fig. 3 Pump pulse and the temporal profile of the intercell stimulated Stokes radiation
(a) pump pulse corresponding to Fig. 2 (a); (b), (c) and (d) Stokes temporal profiles corresponding to two-cell SBS systems in Fig. 2 (b), (c) and (d) respectively

图 3 (b) 中的调制种子光,对泵浦脉冲 B,种子光的第一个脉冲谷,如图 3 (b),位于脉冲 B 的峰附近,意即种子光的起始子脉冲在放大池中与泵浦脉冲的峰值区域相遇,因而 SBS 转换

效率较高,另外相遇区域主要发生在放大池的中前端,从而放大后的脉冲在放大池中的行程较短,介质的吸收也就较小,就如表 1 中列出的,其 SBS 转换效率较高,达 90% 左右。对种子光的第二个子脉冲,泵浦脉冲后沿对其的放大,造成了图 2(b) 脉冲 B_2 在峰后约 4 ns 处出现一个台阶;而对泵浦脉冲 A,种子光的起始子脉冲在放大池中与泵浦脉冲的前沿区域相遇,其放大相对泵浦脉冲 B 要偏小些,值得注意的是种子光的第二个子脉冲发生在泵浦脉冲峰附近,意即泵浦脉冲的峰值区域没被抽空,直接进入振荡池,由于泵浦脉冲 A 的能量约为 100 mJ,而透镜焦距仅 5 cm,从而将产生严重的击穿,降低了种子光的第二个子脉冲强度,也就影响到其在放大池中的放大效率,另外在放大池中第二个子脉冲与泵浦脉冲峰值区域的相遇区域主要在放大池的后端,介质对放大后的子脉冲的吸收相对较大,从而泵浦脉冲 A 的 SBS 总体转换效率是比较小的。从表 1 中看到泵浦脉冲 A 的 SBS 转换效率不到泵浦脉冲 B 的一半。

图 3(c) 中的调制种子光,对泵浦脉冲 B,基本与图 3(b) 相仿,只是种子光起始子脉冲与泵浦脉冲峰值区域在放大池后端附近相遇,放大后的脉冲在放大池中的行程较长,介质的吸收比图 3(b) 稍大,所以表 1 中 B_3 脉冲的 SBS 效率比 B_2 脉冲要小些;对泵浦脉冲 A,种子光起始子脉冲对泵浦脉冲的峰值区域有较大的抽空,从而一定程度上降低了振荡池中的击穿,所以从表 1 中看到, SBS 脉冲 A_3 的效率比 A_2 要高。

图 3(d) 中的调制种子光,对泵浦脉冲 B,种子光起始子脉冲基本仍与泵浦脉冲峰值区域在放大池后端相遇,而此时由于放大池长为 80 cm,介质对放大后的 SBS 脉冲吸收较大,所以表 1 中 SBS 脉冲 B_4 的实测转换效率降低很多;而对于泵浦脉冲 A,种子光起始子脉冲与泵浦脉冲的半高峰区域相遇,放大较为有效,而相遇区域在放大池的前端,从而吸收较小。产生的 SBS 脉冲前沿放大很多,前沿变得很陡,如图 2(c) 的 A_4 脉冲,其转换效率也由 A_3 脉冲的 60% 提高到 A_4 脉冲的 79%。

4 讨 论

4.1 双池系统中振荡池产生的 SBS 脉冲存在明显的脉冲调制,当其经放大池时,由于 SBS 放大强的饱和效应,使得脉冲调制趋于光滑化,特别是对几个纳秒窄脉冲泵浦,对不同长度的放大池,输出的 SBS 脉冲还是相对光滑的。

4.2 我们看到对于几个纳秒窄脉冲泵浦的双池系统,其放大池长度和透镜焦距对 SBS 脉冲的形状和转换效率都有较大的影响。为获得高的 SBS 转换效率,在设计双池系统参数时,应尽量满足两个原则:(1) 振荡池的调制种子光的起始子脉冲在放大池中能与泵浦脉冲峰值区域相遇(种子光的调制谷宽以接近泵浦脉冲半高宽为宜),以求获得最有效的 SBS 放大。(2) 通过种子光与泵浦光相向传输的分析,种子光的调制子脉冲最好在放大池的前端(即 SBS 输出端)附近与泵浦脉冲的峰值区域相遇,这样可以减少介质的吸收,以提高总体的 SBS 转换效率。

4.3 双池 SBS 系统的参数决定了光信号在其中来回传输的时间 τ ,这也决定了系统的传输响应时间,所以泵浦脉冲的脉宽应大于 τ 。另外, SBS 种子光的放大是一个相干作用过程,所以泵浦激光的相干长度必需大于光信号在双池系统中来回传输的总光程。

4.4 双池 SBS 系统的优点在于种子光在放大池中的放大,对泵浦光能量抽空,从而减弱了到达振荡池的泵浦脉冲能量,提高了整体对泵浦激光能量的承受能力。如果透镜焦点到放大池后

端的间距较大,那么种子光起始子脉冲较宽,在放大池中有利于对泵浦光能量的抽空,但是这个间距过大,在起始时刻将有足够大的能量到达振荡池,从而导致光学击穿。所以,希望尽量采用紧凑的双池系统,即在确定透镜焦距后尽量取小的 L 值。

参 考 文 献

- 1 D. A. Rockwell. A review of phase-conjugate solid-state lasers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1988, QE-24(6) : 1124~1140
- 2 A. F. Vassil'ev, V. E. Yashin. Stimulated Brillouin scattering at high values of the excess of the pump energy above the threshold. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1987, 17(5) : 644
- 3 G. J. Crofts, M. J. Damzen. Steady-state analysis and design criteria of two-cell stimulated Brillouin scattering systems. *Opt. Commun.*, 1991, 81(3,4) : 237
- 4 G. J. Crofts, M. J. Damzen, R. A. Lamb. Experimental and theoretical investigation of two-cell stimulated-Brillouin-scattering systems. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, 8(11) : 2282
- 5 V. N. Alekseev, V. V. Golubev, D. I. Dmitriev *et al.*. Investigation of wavefront reversal in a phosphate glass laser amplifier with a 12-cm output aperture. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1987, 17(4) : 455~458
- 6 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
- 7 M. S. Mangir, D. A. Rockwell. 4.5 J Brillouin phase-conjugate mirror producing excellent near-and far-field fidelity. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, 10(8) : 1336~1340

Two-cell Stimulated-Brillouin-scattering Systems Pumped with Narrow-pulse-width Laser

He Weiming Lu Zhiwei Wang Qi Ma Zuguang

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

Abstract The pumping laser pulse of narrow pulse-width together with its leading edge shape as well as parameters of the two-cell stimulated-Brillouin-scattering (SBS) systems have an influence on the SBS pulse intensity and conversion efficiency. Two narrow pulses with different leading edges pump the two-cell systems simultaneously. By changing the amplifier-cell length and the focal length, different conversion efficiencies were observed. The two SBS pulses results are analyzed with transient seeded Stokes in the amplifier-cell. A method to design the two-cell systems is proposed.

Key words stimulated-Brillouin-scattering system, two amplifier-cell, travelling wave amplifying