

文章编号: 0258-7025(2004)11-1327-05

高负载脉宽可调双池受激布里渊散射系统的实验研究

吕志伟¹, 哈斯乌力吉^{1,2}, 何伟明¹, 杨 璿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 为了提高双池受激布里渊散射(SBS)系统的能量转换效率和负载能力,在布里渊放大池和产生池中选用布里渊频移接近的不同介质,利用 Nd:YAG 调 Q 激光对其特性进行了实验研究。与同种介质的双池系统相比,不仅能保持足够的能量转换效率,而且能够有效地提高其负载能力和稳定性。分析和讨论了双池间距对受激布里渊散射性能的影响。

关键词 非线性光学;双池受激布里渊散射系统;能量转换效率;负载能力

中图分类号 O 437.2 **文献标识码** A

Experimental Study on a Two-Cell Stimulated Brillouin Scattering System with Tunable Pulse Duration and High Power

LÜ Zhi-wei¹, HASI Wu-li-ji^{1,2}, HE Wei-ming¹, YANG Jun¹

(¹ Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)
(² Faculty of Chemistry, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao, Neimenggu 028043, China)

Abstract In order to enhance the energy conversion efficiency and the power-load of two-cell stimulated Brillouin scattering (SBS) system, different liquid SBS mediums with almost similar Brillouin frequency shifts are used in the generator cell and the amplifier cell. The characteristics of the SBS system are investigated experimentally with Nd:YAG Q-switched laser. Compared with two-cell SBS system with the same liquids, it can not only keep enough high-energy conversion efficiency, but also can effectively improve the system power-load ability and stability. The influences of the distance between the two cells on the SBS characteristics are analyzed in detail.

Key words nonlinear optics; two-cell stimulated Brillouin scattering system; energy conversion efficiency; power-load

1 引 言

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,因此人们从理论和实验上广泛研究了各种介质的受激布里渊散射效应及其相位共轭特性。1981年, N. G. Basov 等提出了双池受激布里渊散射系统^[1],它由较短的受激布里渊散射产生池、较长的放大池和

聚焦透镜组成,准直或弱聚焦的抽运光先通过放大池,然后通过透镜聚焦到产生池中产生种子光,种子光在放大池中与抽运光耦合,并得到有效地放大。尽管双池受激布里渊散射系统比单池系统有所改进,但也受到介质吸收系数和光学击穿阈值的限制。首先,大部分介质的吸收系数比较大,因此较长的放大池中能量损耗过大;其次,虽然有些介质吸收系数

收稿日期:2003-07-07;收到修改稿日期:2004-02-18

基金项目:1999年教育部“跨世纪优秀人才培养计划”基金、国家高技术惯性约束聚变主题和国家自然科学基金(批准号:60278033,60088001)资助项目。

作者简介:吕志伟(1961—),男,哈尔滨工业大学光电子技术研究所教授,博士生导师,主要从事非线性光学、激光光谱学、新型光电子技术及器件等方面的研究。E-mail: zhiweilu@yeah.net

很小,但是光学击穿阈值比较低,因此抽运光比较强时,容易出现光学击穿现象,从而导致相位共轭保真度、能量反射率和稳定性等性能的降低^[2]。虽然有人曾经提出采用双池之间加入衰减片的方法降低入射到产生池的抽运光光强^[3],但是衰减片的加入不仅降低了抽运光光强,而且降低了种子光光强,从而导致种子光能量提取效率的降低。

常用的液体介质中一些介质(如 CCl_4 和 CS_2 等)的光学击穿阈值很低,但吸收系数很小;而另一些介质^[4](如丙酮、正己烷、环己烷、苯、甲苯、甲醇和乙醇等)的吸收系数较大,但光学击穿阈值相对较高。如果放大池和产生池中选用不同介质,即放大池中选用吸收系数小的介质,而产生池中选用光学击穿阈值高的介质,那么就会降低放大池的能量损耗,提高产生池的负载能力。当然,条件是这两种介质的布里渊频移要接近,其布里渊线宽存在一定的交叉。本文在放大池中选用吸收系数小的 CCl_4 ,而产生池中选用光学击穿阈值高的正己烷和甲醇,利用 Nd:YAG 调 Q 激光对其特性进行实验研究。与同种介质的双池系统相比不仅能保持足够的能量转换效率,而且能够有效地提高其负载能力和稳定性。

2 实验装置和介质

2.1 实验装置

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 dye,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,防止受激布里渊散射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,反射镜 R 反射出一部分抽运光,以便测量其特性。受激布里渊散射系统由放大池、产生池和透镜 L_3 组成,放大池(池长为 60 cm)前面放入凸透镜 L_1 和凹透镜 L_2 ,其目的是对抽运光缩束以增强放大池中抽运光的强度,并尽可能保持光束截面不变;抽运光被透镜 L_3 (焦距为 5 cm)聚焦到产生池(池长为 30 cm)中产生种子光,产生的种子光在放大池中与抽运光耦合,并得到有效的放大,经过 1/4 波片后变为 S 偏振光,再被偏振片 P_2 反射。抽运光和受激布里渊散射光的能量用能量计 ED200 探测,脉冲波形用 PIN 光电二极管探测,用数字示波器 TDS684A 记录。

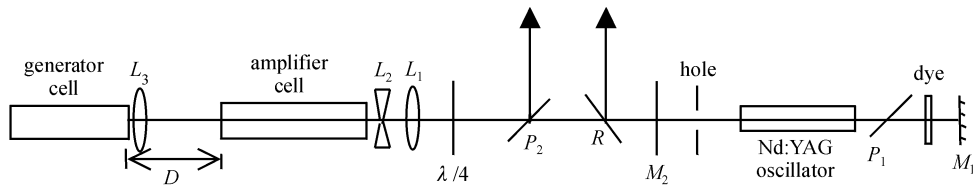


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

2.2 介质的选取

放大池和产生池中的介质不同时,放大池是否能仍然确保足够的布里渊放大,对此进行了大量的实验研究。实验结果表明,只有在两种介质的布里渊频移接近时有放大作用,而布里渊频移差异较大时没有放大作用,如放大池中的介质为 CCl_4 时,产生池中的介质是丙酮、正己烷、甲醇和乙醇时有放大作用,而产生池中的介质是 CS_2 ,苯,环己烷和水时没有放大作用。这是因为每种介质都有一定宽度的布里渊线宽,两种介质的布里渊频移接近时,有一部分布里渊线宽互相重叠在一起,因此有放大作用。重叠程度与放大作用之间的关系有待研究。

首先测定了 CCl_4 ,丙酮,正己烷,甲醇和乙醇的吸收系数和光学击穿阈值(定义为介质内可见闪光或火花出现的概率为 80% 时的输入光功率密度)

(列于表 1)。若放大池中分别选用 CCl_4 ,丙酮,正己烷,甲醇和乙醇,池长 60 cm 时,光束每次通过时的能量损耗分别为 16.4%,73.2%,94.0%,99.9% 和 99.9%,这就说明放大池中必须选用吸收系数很小的介质,否则能量损耗过大。介质的光学击穿阈值不仅与其所含颗粒的大小有关,还与本身化学特性有关。分子中化学键四周被外层原子包围得越严密,电离能越高,电子亲合能越小,键能越高,该分子就越不容易电离或断裂,因此光学击穿阈值就越高。另外,吸收系数越大,抽运光到达焦点之前被介质吸收的越多,因此越不易出现光学击穿现象。为了降低放大池的能量损耗,提高产生池的负载能力,在放大池中只选用了吸收系数最小的 CCl_4 ,而产生池中分别选用了正己烷和甲醇。由于正己烷和甲醇的布里渊频移接近于 CCl_4 ,而且它们的吸收系数远远大

于 CCl_4 , 因此不仅能保持足够的能量放大, 而且能够有效地提高负载能力(提高了 5 倍以上)。表 1 给出了以上介质的受激布里渊散射参数, 其中带有星

号的参数是根据文献[5]的方程计算而得, 其他参数摘自文献[6, 7]。

表 1 液体介质的受激布里渊散射参数

Table 1 Some related parameters of SBS liquid mediums

	CCl_4	Acetone	<i>n</i> -Hexane	Methanol	Ethanol
Refractive index n	1.46	1.358	1.375	1.328	1.361
Absorption coefficient α / cm^{-1}	0.003	0.022	0.047	0.156	0.119
SBS threshold / mJ	3	7	12	24	22
SBS gain coefficient $g / (\text{cm}/\text{GW})$	6	15.8	26	13	12
Hypersound decay time τ / ns	0.6	2.67	3.24*	1.27*	0.9*
Frequency shift ν / MHz	4390	4600	4402*	4250	4550
Line width Γ / MHz	520	224	222	250	353
Optical breakdown threshold $/(\text{GW}/\text{cm}^2)$	15	20	75	85	80

Note: at 20°C for $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$.

3 实验结果及讨论

实验时 Nd:YAG 调 Q 激光器输出抽运光波长为 $1.064 \mu\text{m}$, 重复频率为 1 Hz, 脉宽为 9.0~10.0 ns, 能量约为 23.0 mJ, 受激布里渊散射放大池中的介质均为 CCl_4 , 而产生池中的介质分别为正己烷, CCl_4 和甲醇。以上三类双池系统分别用 $\text{CCl}_4 + \text{正己烷}$, $\text{CCl}_4 + \text{CCl}_4$ 和 $\text{CCl}_4 + \text{甲醇}$ 的方法来表示。

三类双池系统的受激布里渊散射脉宽随双池间距 D 的变化规律相似, 只是受激布里渊散射脉宽及其稳定性有差异(如图 2 所示)。双池间距小于 40 cm 左右时, 随着双池间距的增大受激布里渊散射脉宽缓慢变宽; 双池间距在 40~60 cm 左右时, 随着双池间距的增大受激布里渊散射脉宽迅速变宽, 脉冲后沿出现“平台”; 双池间距大于 60 cm 左右时, 脉冲峰顶出现“平台”, 偶尔还会出现双重峰, 因此图 2 中未画出双池间距大于 60 cm 时的脉宽。三类双池系统的能量反射率随双池间距的变化规律也相似, 只是能量反射率及其稳定性有差异, 随着双池间距的增大能量反射率逐渐降低, 最后几乎变为一个恒定值(如图 3 所示)。 $\text{CCl}_4 + \text{正己烷}$ 和 $\text{CCl}_4 + \text{CCl}_4$ 的能量反射率在双池间距大于 90 cm 时, 变为一个恒定值, 而 $\text{CCl}_4 + \text{甲醇}$ 的能量反射率在双池间距大于 70 cm 左右时, 就变为一个恒定值。另外, 三类双池系统的近场光斑图也相似(如图 4 所示)。

种子光与抽运光相向传播, 在放大池中种子光被抽运光放大, 且放大作用主要发生在种子光前沿, 从放大池中最终出射的受激布里渊散射光脉冲宽度由种子光的脉宽及其前沿的放大程度决定^[8]。对于

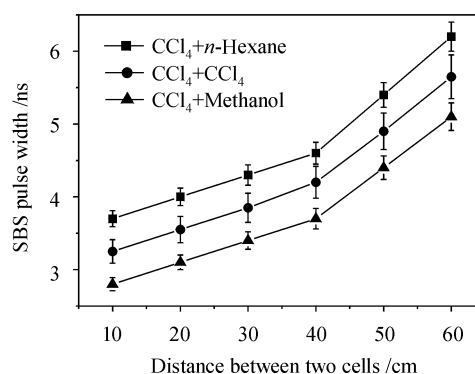


图 2 受激布里渊散射脉宽随双池间距 D 的变化
Fig. 2 SBS pulse width versus the distance between two cells

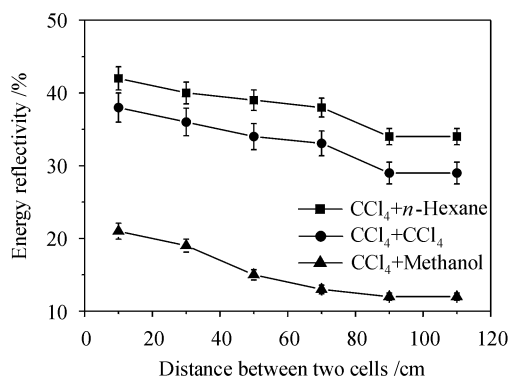


图 3 能量反射率随双池间距 D 的变化
Fig. 3 Energy reflectivity versus the distance between two cells

双池系统来说, 双池间距的改变意味着放大池中种子光与抽运脉冲相对延迟时间的改变, 即与种子光相互作用的抽运脉冲部位和有效相互作用时间发生

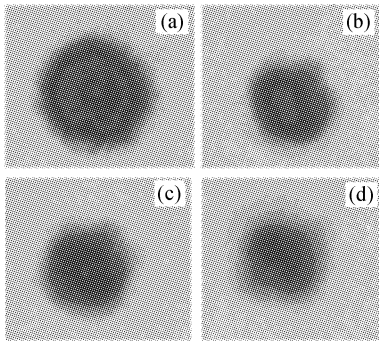


图 4 近场光斑图

(a) 抽运光斑; (b), (c), (d) 分别为 CCl_4 + 正己烷, CCl_4 + CCl_4 和 CCl_4 + 甲醇的受激布里渊散射光斑

Fig. 4 Near-field patterns for the input signal (a), SBS signal for CCl_4 + *n*-Hexane (b), SBS signal for CCl_4 + CCl_4 (c), SBS signal for CCl_4 + Methanol (d)

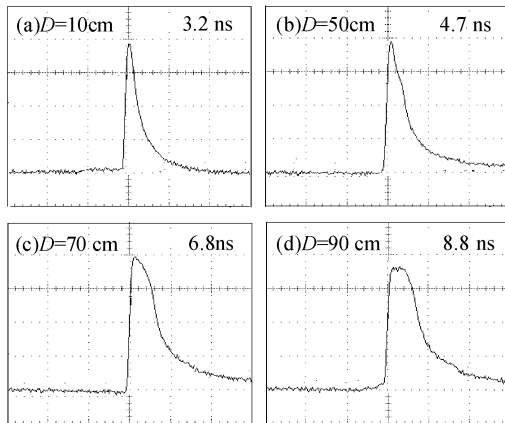
图 5 CCl_4 + 正己烷的受激布里渊散射波形

Fig. 5 SBS pulse shapes for CCl_4 + *n*-Hexane
(*D* is the distance between two cells)

变化。双池间距小于 40 cm 左右时,在放大池左端种子光与抽运脉冲前沿相遇,在放大池中种子光与抽运脉冲有效相互作用时间长,因此种子光前沿经历了很强的放大,可以获得窄脉冲的受激布里渊散射光,这时脉宽主要取决于种子光前沿放大程度,增大池间距,前沿的放大略有减小,受激布里渊散射脉宽稍有增加。双池间距在 40~60 cm 左右时,在放大池左端种子光与抽运脉冲峰值区域相遇,在放大池中种子光与抽运脉冲有效相互作用时间变短,前沿的放大明显减小,种子光得不到充分放大,受激布里渊散射脉冲后沿出现一个“平台”,这个“平台”即是未被放大的种子光,因此受激布里渊散射脉宽迅速变宽。双池间距大于 60 cm 时,在放大池左端种子光与抽运脉冲后沿相遇,在放大池中种子光与抽运脉冲有效相互作用时间变得更短,放大作用减弱,

种子光被放大的程度更小,因此受激布里渊散射脉冲峰顶出现“平台”^[9](如图 5 所示)。偶尔还会出现双重峰,这是因为种子光的抽空效率降低时,未被抽空的抽运光的能量提高,在产生第一个种子光之后,未被抽空的抽运光在产生池中也能达到受激布里渊散射阈值,从而产生了第二个种子光。受激布里渊散射脉冲峰顶出现“平台”或双重峰时,稳定性很低。

双池间距逐渐变大时,在放大池左端种子光依次与抽运脉冲前沿、峰值区域和后沿相遇,在放大池中种子光与抽运脉冲有效作用时间逐渐变短,最终种子光与抽运脉冲不能相遇,因此能量反射率逐渐降低,最后变为一个恒定值。

相同实验条件下 ($D = 10$ cm),三类双池系统的能量反射率随输入能量的变化关系如图 6 所示。输入能量小于 25 mJ 时,随着输入能量的提高,三类双池系统的能量反射率均提高;但输入能量大于 25 mJ 时,随着输入能量的提高, CCl_4 + CCl_4 出现严重的光学击穿现象,因此其能量反射率开始下降;而 CCl_4 + 正己烷和 CCl_4 + 甲醇仍然不出现光学击穿现象,因此它们的能量反射率继续升高。光学击穿现象同时也影响了双池系统的稳定性, CCl_4 + CCl_4 的能量反射率稳定度(定义为测量值均方差与算术平均值之比)为 5%~7%,而 CCl_4 + 正己烷和 CCl_4 + 甲醇能量反射率稳定度均为 3%~5%。

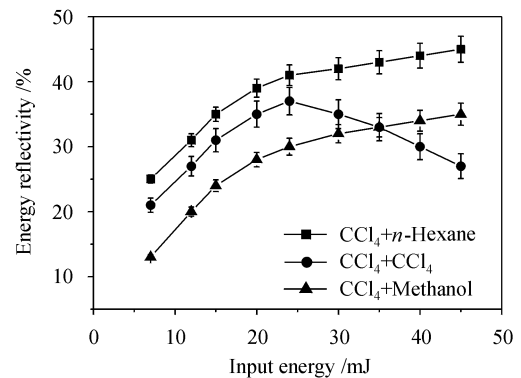


图 6 能量反射率随输入能量的变化

Fig. 6 Energy reflectivity versus the input energy

以上三类双池系统的受激布里渊散射脉宽、能量反射率和稳定性的差异主要是由种子光的脉宽、能量反射率和稳定性的差异所引起的。我们对正己烷, CCl_4 和甲醇分别进行了单池受激布里渊散射研究,即去掉放大池,而其他实验条件不变(脉宽约为 9.0 ns, 能量约为 23.0 mJ)。此时,它们的受激布里渊散射脉宽分别为 6.6, 6.4, 5.8 ns, 能量反射率及

其稳定度分别为 26.7%, 24.7%, 7.4% 和 4.1%, 5.7%, 4.3%。虽然正己烷的吸收系数比 CCl_4 的大一个数量级,但正己烷的增益系数比 CCl_4 的大 4~5 倍,因此聚焦深度比较浅时, CCl_4 和正己烷的脉冲压缩率和能量反射率接近。以上三种介质中甲醇的吸收系数特别大,对于吸收系数较大的介质来说,介质对抽运光和受激布里渊散射光的吸收较大,焦点附近的抽运功率密度较低,受激布里渊散射产生时间较晚,因此甲醇受激布里渊散射脉宽最窄,能量反射率最低。另外, CCl_4 + 甲醇双池系统的能量反射率在双池间距比较小(70 cm)时就变为恒定值,也是由种子光的产生时间较晚所引起的。

4 结 论

为了提高双池受激布里渊散射系统的能量转换效率和负载能力,在布里渊放大池和产生池中选用布里渊频移接近的不同介质,即在放大池中选用吸收系数小的 CCl_4 ,而产生池中选用光学击穿阈值高的正己烷和甲醇。实验结果表明,与同种介质的双池系统相比,不仅能保持足够的能量转换效率,而且能够有效地提高负载能力和稳定性。另外,受激布里渊散射脉宽随双池间距的变化规律类似于相同介质,即脉宽可调。实验研究在提高双池受激布里渊散射系统的能量转换效率、负载能力和稳定性方面具有一定的指导作用。

参 考 文 献

- 1 N. G. Basov, V. F. Efimkov, I. G. Zubarev *et al.*. Control of the characteristics of reversing mirrors in the amplification regime [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1981, **11**(10):1335~1337
- 2 N. F. Andreev, E. Khazanov, G. A. Pasmanik. Application of Brillouin cell to high repetition rate solid-state laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(1):330~341
- 3 C. Brent Dane, W. A. Neuman, L. A. Hackel. High-energy SBS pulse compression [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(8):1907~1915
- 4 W. Kaiser, M. Maier. Stimulated Rayleigh, Brillouin, and Raman Spectroscopy [M]. *Laser Handbook*, Vol. 2, Amsterdam: North-Holland, Publ. Co., 1972. 1077~1150
- 5 A. I. Erokhin, V. I. Kovalev, F. S. Faizullov. 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 Chen Jun, Jiang Ruzhong. Nd:YAG laser with SBS phase conjugate mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 1991, **11**(8):715~719
陈 军,蒋汝忠.带受激布里渊散射相位共轭镜的 Nd:YAG 激光器[J]. *光学学报*, 1991, **11**(8):715~719
- 7 R. W. Boyd. *Nonlinear Optics* [M]. San Diego: Academic Press, 1992. 359
- 8 Lü Zhiwei, Liu Li, He Weiming *et al.*. Generation of high-quality tunable-duration pulses by phase conjugating mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(3):389~394
吕志伟,刘 莉,何伟明等.利用相位共轭镜产生高质量宽度可调脉冲[J]. *光学学报*, 2000, **20**(3):389~394
- 9 He Weiming, Lü Zhiwei, Wang Qi *et al.*. Two-cell stimulated Brillouin scattering mirror compressing pulse width of Q-switched YAG oscillator [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(4):450~453
何伟明,吕志伟,王 骐等.双级受激布里渊散射相位共轭镜压缩 YAG 振荡器调 Q 脉宽[J]. *光学学报*, 1996, **16**(4):450~453