

# SBS 相位共轭腔激光器的调 $Q$ 效果与 起始腔稳定性的关系

葛传文 张为俊 王 沛 苏 红 高晓明 聂劲松  
(中国科学院安徽光机所激光光谱学开放实验室 合肥 230031)

**提要** 从理论上导出了起始腔的稳定性与腔内光学元件的布置及其参数之间的关系, 实验验证了高衍射损耗的非稳定起始腔有利于提高相位共轭激光器的调  $Q$  效果; 实验观察了蒸馏水作为 SBS 介质时, 相位共轭激光器的输出特性, 并与高增益的二硫化碳介质作了相应的比较, 分析了它们之间差别产生原因。

**关键词** 受激布里渊散射(SBS), 相位共轭腔, 起始腔稳定性, 调  $Q$  效果

## 1 引 言

受激布里渊散射(SBS)作为相位共轭镜应用于激光谐振腔, 具有许多优越性, 利用其自调  $Q$  特性作腔内被动  $Q$  开关, 在各种高功率窄脉冲新波段激光器中有着极其重要的应用前景<sup>[1]</sup>。在相位共轭激光器中, 为了提高调  $Q$  效果, 获得高功率窄脉冲输出, 必须使起始腔的损耗很大, 相位共轭腔的损耗很小<sup>[2]</sup>。增大起始腔损耗的方法有两种: 一、适当选取起始腔中光学元件的参数及布置, 使之成为非稳腔, 增大其衍射损耗, 特别是高阶横模的损耗, 而低损耗的基横模仍能迅速增强; 二、在 SBS 池与后腔镜之间插入衰减片, 但衰减片对各阶横模的损耗都一样, 对基横模的建立没有特别的有利之处<sup>[3]</sup>。因此, 使起始腔成为非稳腔, 既能改善相位共轭腔的调  $Q$  效果, 又能提高输出光束的质量, 从这方面来看, 非稳腔比衰减片更为优越。减小相位共轭腔损耗的方法是尽量提高 SBS 相位共轭镜的反射率。起始腔的高损耗延缓了腔内光场的增强, 推迟了强 SBS 后向散射即低损耗相位共轭腔的形成, 有利于激光工作介质中反转粒子数的大量积累。

## 2 理论分析

在起始腔中置入聚焦透镜  $F_1, F_2$  及 SBS 介质之后, 腔的稳定性将发生变化, 根据矩阵光学理论和谐振腔的稳定性判据, 可以分析出腔的稳定区和非稳区范围。如图 1 所示, 假设焦距分别为  $f_1, f_2$  的两个正透镜相距  $D$ , 它们之间放置长度为  $d$  的 SBS 池, 池中注满折射率为  $n_1$  的 SBS 介质。由矩阵光学理论<sup>[4]</sup>可知, 透镜  $F_1, F_2$  及 SBS 介质所组成的部分可等效成一个透镜  $F$ , 其等效焦距  $f$  由下式确定

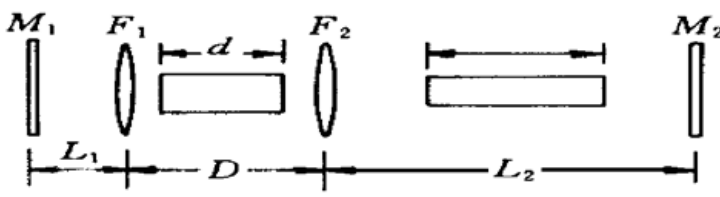


图 1 起始腔内光学元件的布置

Fig. 1 Arrangement of the optical elements in primary resonator

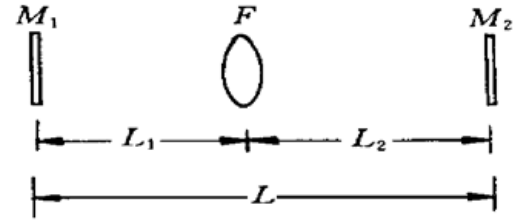


图 2 图 1 的等效谐振腔

Fig. 2 Equivalent resonator of Fig. 1

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{D'}{f_1 f_2} \tag{1}$$

式中  $D'$  为两透镜之间的约化厚度

$$D' = \frac{D - d}{1} + \frac{d}{n_1} = \frac{n_1 D - n_1 d + d}{n_1} \tag{2}$$

激光工作介质棒长为  $l$ , 相对于腔内聚焦透镜  $F_1, F_2$  来说, 棒的热透镜效应(氙灯输入功率不太高的条件下, 热透镜焦距接近 1000 mm 量级, 很大于  $F_1, F_2$ ) 的影响可忽略, 而只需考虑棒的折射率  $n_2$  的影响, 则整个谐振腔简化为腔内只含有一个透镜  $F$  的等效谐振腔<sup>[5]</sup>, 如图 2 所示

$$L_2' = \frac{L_2 - l}{1} + \frac{l}{n_2} = \frac{n_2 L_2 - n_2 l + l}{n_2} \tag{3}$$

为  $F_2$  与  $M_2$  之间的约化厚度,  $L'$  为等效谐振腔的总长度。等效谐振腔的  $g$  参数

$$g_1 = 1 - \frac{L_1}{f} - \frac{L'}{R_1}, \quad g_2 = 1 - \frac{L_2'}{f} - \frac{L'}{R_2}$$

式中  $R_1, R_2$  分别为平面腔镜  $M_1, M_2$  的曲率半径, 它们皆为无穷大。因此

$$g_1 = 1 - \frac{L_1}{f}, \quad g_2 = 1 - \frac{L_2'}{f} \tag{4}$$

根据谐振腔的稳定性判据<sup>[5]</sup>可知, 当

$$0 < g_1 g_2 < 1 \tag{5}$$

时, 等效谐振腔为稳定腔, 否则为非稳腔。

综合(1)~(5)式, 可得腔的稳定性与腔内光学元件参数及位置之间的关系

$$0 < \left[ 1 - \left[ \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{n_1 D - n_1 d + d}{f_1 f_2 n_1} \right] L_1 \right] \times \left[ 1 - \left[ \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{n_1 D - n_1 d + d}{f_1 f_2 n_1} \right] \left[ \frac{n_2 L_2 - n_2 l + l}{n_2} \right] \right] < 1 \tag{6}$$

### 3 实验装置

实验装置如图 3 所示, 其中平面反射镜  $M_1$  与  $M_2$  构成起始谐振腔,  $M_1$  为全反射镜,  $M_2$  为反射率 20% 的部分反射镜, SBS 池两端放置聚焦透镜  $F_1, F_2$ , 焦距都为 35 mm, 起始谐振腔自由振荡形成的腔内初始激光场, 经两透镜聚焦于 SBS 池中心附近, 随着腔内自由振荡激光场强度的增大, 焦点附近光场的功率密度也随之增强, 达到一定的阈值强度时, 便在介质中激发起相应强度的密度光栅, 它对后继入射光场具有向后的散射作用, 成为反射率随腔内光强增大的相位共轭镜, 替代起始谐振腔的后腔镜  $M_1$ , 与  $M_2$  组成所谓的相位共轭谐振腔。激光器输出脉

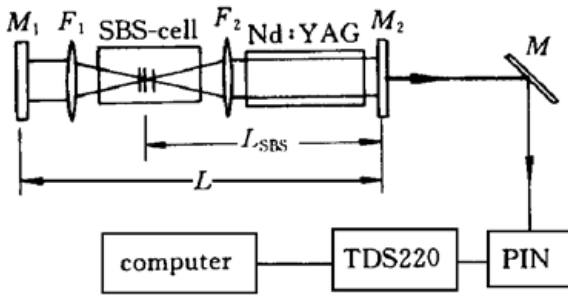


图 3 实验布置示意图

Fig.3 Experimental arrangement

冲经反射镜  $M$  反射至 PIN 光电管,再由 TDS220 数字示波器采集其波形;激光器输出光束的近场光斑用黑色相纸记录,远场光斑大小则用柯达红外探测卡观察,由近场和远场光斑的大小测算光束发散角,分析光束质量。

### 4 实验结果与讨论

#### 4.1 两种条件下的输出脉冲特性

1) 在 SBS 池中注满蒸馏水,透镜  $F_1, F_2$  的焦距  $f_1 = f_2 = 35 \text{ mm}$ , SBS 池长  $d = 70 \text{ mm}$ , 蒸馏水的折射率  $n_1 = 1.33$ , 调整光路如图 3 所示, 其中  $L_1 = 100 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 380 \text{ mm}$ , Nd·YAG 棒长 =  $110 \text{ mm}$ , 折射率  $n_2 = 1.82$ 。腔内光学元件参数及布置确定之后, 起始腔的稳定性仅仅与透镜  $F_1, F_2$  之间的距离  $D$  有关, 将上述数值代入 (6) 式, 可得: 当  $69.2 \text{ mm} < D < 74.5 \text{ mm}$  或  $83.3 \text{ mm} < D < 89.7 \text{ mm}$  时, 起始腔为稳定腔, 否则为非稳腔。实验中, 保持氙灯的抽运电压为  $750 \text{ V}$ , 将  $D$  值调至稳定区时, 如图 4 所示, 输出波形有一弱的前沿尖峰, 随后是静态输出, 脉宽约  $40 \mu\text{s}$  (FWHM), 比完全自由振荡时的静态输出脉宽  $150 \mu\text{s}$  (FWHM) 窄, 脉冲前沿已有调  $Q$  成分; 将  $D$  值调至非稳定区  $74.5 \text{ mm} < D < 83.3 \text{ mm}$  时, 如图 5 (a) 所示, 完全调  $Q$  输出波形的脉宽约  $30 \text{ ns}$  (FWHM), 用黑色相纸记录其近场光斑如图 5 (b), 相纸上记录了连续打出的九个脉冲光斑, 光斑虽然很小, 但却相当均匀, 测算其光束发散角约为  $1.8 \text{ mrad}$ , 已很接近于衍射极限。但在非稳定区  $D > 89.7 \text{ mm}$  时, 没有获得理想的调  $Q$  输出波形, 其原因可能是当  $D$  值太大时, 焦距都为  $35 \text{ mm}$  的聚焦透镜  $F_1, F_2$  在 SBS 池中的焦点位置相距太大, 不利于 SBS 介质中密度光栅的产生<sup>[6]</sup>, 使低损耗的相位共轭腔难以形成。对于  $D < 69.2 \text{ mm}$  的非稳区, 由于其短于 SBS 池长  $70 \text{ mm}$ , 未对其进行实验。

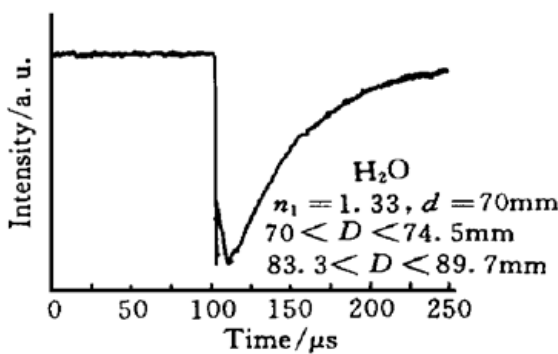


图 4 稳定起始腔时的输出脉冲的时间波形

Fig.4 Temporal shape of output pulses with stable primary resonator

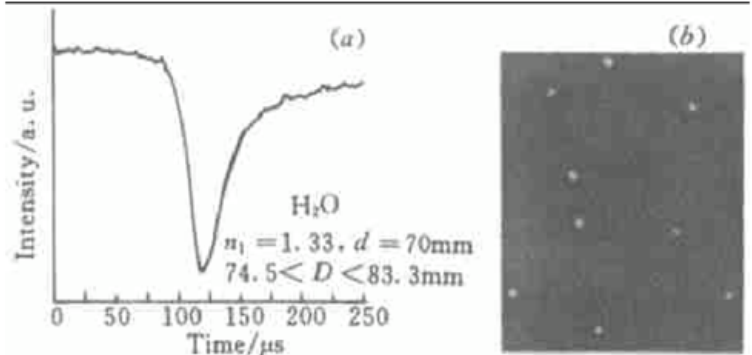


图 5 非稳定起始腔时的输出调 Q 脉冲 (a) 时间波形; (b) 近场光斑

Fig.5 Q-switched pulse output with unstable primary resonator (a) temporal shape; (b) near field spot

2) 改变 SBS 池的长短及其中的介质, 新 SBS 池长度  $d = 20 \text{ mm}$ , 池内注满二硫化碳液体, 其折射率  $n_1 = 1.63$ , 把这两个新参数值及其他未变化的参数值代入 (6) 式得: 当  $63.8 \text{ mm} < D < 65.3 \text{ mm}$  或  $73.9 \text{ mm} < D < 74.8 \text{ mm}$  时, 起始腔为稳定腔, 否则为非稳腔。如图 6 所示,  $D$  值调至稳定区时, 输出脉宽约  $37.5 \mu\text{s}$  (FWHM), 脉冲前沿已有部分调  $Q$  成分;  $D$  值调至非稳

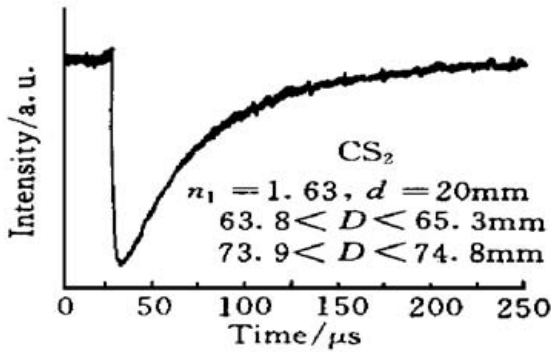


图 6 稳定起始腔时的输出脉冲的时间波形

Fig. 6 Temporal shape of output pulses with stable primary resonator

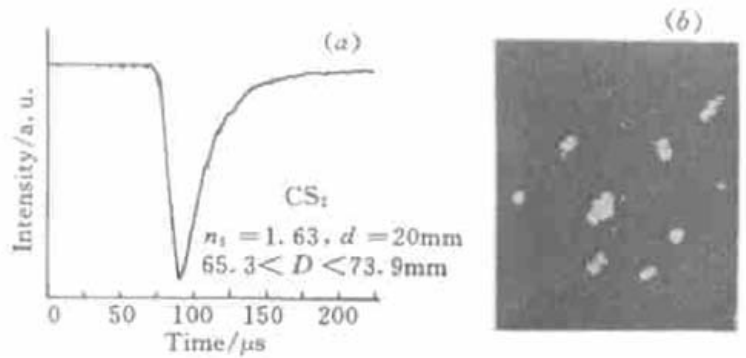


图 7 非稳定起始腔时的输出调 Q 脉冲 (a) 时间波形; (b) 近场光斑

Fig. 7 Q-switched pulse output with unstable primary resonator (a) temporal shape; (b) near field spot

定区时, 获得了如图 7(a) 所示的完全调 Q 输出波形, 脉宽约 25 ns(FWHM), 用黑色相纸记录其近场光斑如图 7(b), 相纸上记录了连续打出的八个脉冲光斑, 光斑明显比图 5(b) 所示的大, 且形状和大小都有一定的波动性, 进一步测算其平均光束发散角约为 2.3 mrad。对于  $D < 63.8 \text{ mm}$  或  $D > 74.8 \text{ mm}$ , 虽为非稳区范围却没能得到理想的调 Q 输出, 其原因同样可以认为是: 透镜  $F_1, F_2$  (焦距 35 mm) 在 SBS 池中的焦点位置相距太大, 对于长度仅为 20 mm 的 SBS 池, 两焦点甚至无法落入池内, 这些都使  $\text{CS}_2$  介质中的高反射率 SBS 密度光栅难以产生, 低损耗的相位共轭腔无法形成。

### 4.2 对两种 SBS 介质的比较与讨论

用蒸馏水和二硫化碳作 SBS 介质时, 其近场光斑及光束发散角有所不同, 蒸馏水为低增益(0.0048 cm/MW)高阈值的 SBS 介质, 而二硫化碳却是高增益(0.13 cm/MW)低阈值介质, 根据受激散射阈值效应<sup>[7]</sup>, 起始腔内光场在抽运 SBS 介质时, 总是光强最强的中心部分首先达到阈值而产生后向的 SBS 受激散射, 抽运低增益高阈值的蒸馏水介质时, 只有中心很小部分可达到阈值, 而抽运高增益低阈值的二硫化碳介质时, 除基横模外, 一些强度较弱的高阶横模也能达到阈值而起振, 使其近场光斑偏离纯基横模的高斯分布, 由于电源抽运电压的起伏, 光斑的形状和大小还有一定的波动性, 如图 7(b) 所示。因此, 与二硫化碳介质相比, 蒸馏水作 SBS 介质时, 相位共轭激光器所输出脉冲的近场光斑变小了许多, 光束发散角也减小了, 这是其优越之处, 而对激光工作介质中能量的提取率低则是其不足之处。

### 4.3 小结

改变(6)式中的其他任何参数值, 比如, 改变透镜  $F_1, F_2$  的焦距  $f_1, f_2$ , 改变  $L_1, L_2$  的大小, 改变 SBS 池内的介质等等, 都能改变起始腔的稳定区范围, (6)式可以帮助我们设计各种起始腔, 并保证它们为非稳腔, 因此可改善相位共轭腔的调 Q 效果。

### 参 考 文 献

- 1 Chen Jun, Jiang Ruzhong. Nd:YAG laser with SBS phase conjugate mirror. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1991, 11(8): 715~ 719 (in Chinese)
- 2 N. N. Il'ichev, A. A. Malutin, P. P. Pashinin. Laser with diffraction-limited divergence and Q-switching by stimulated Brillouin scattering. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1982, 12(9): 1161~ 1164

- 3 Zhong Ming, Han Kai, Li Tong *et al.*. Characteristic investigation of (Nd, Ce)-YAG laser resonator with a phase conjugating mirror based on SBBS in CH<sub>4</sub> gas. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1994, **A21**(10): 804~808
- 4 Zhu Qingchun, Chen Shisheng (translator). Introduction to Matrix Optics. Shanghai: Science and Technology Document Press, 1991. 61~62 (in Chinese)
- 5 W. Koechner (writer), Hua Guang (translator). Solid-state Laser Engineering. Beijing: Science Press, 1983. 377~382, 204~206, 198~199 (in Chinese)
- 6 Yao Mingyan, Tang Jianming. Investigation of *Q*-switching based with stimulated Brillouin scattering. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1992, **12**(2): 144~148 (in Chinese)
- 7 Wang Yuezhu, Lin Dianyang, Tan Mingwen *et al.*. Study of the divergence of stimulated Brillouin scattering. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1992, **12**(10): 869~872 (in Chinese)

### Relation between *Q*-switch Effect and Primary Resonator Stability in Phase Conjugation Laser Based on SBS

Ge Chuanwen Zhang Weijun Wang Pei Shu Hong Gao Xiaoming Nie Jinsong  
(*Laser Spectroscopy Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031*)

**Abstract** In this paper, the influence of the primary resonator's stability on the *Q*-switch is experimentally studied, the results have shown that unstable primary resonator with high diffraction losses can improve the *Q*-switch effect of phase conjugation cavity laser. The characteristic of output pulses from two types of phase conjugation cavity lasers with H<sub>2</sub>O and CS<sub>2</sub> SBS medium, was compared and analyzed.

**Key words** stimulated Brillouin scattering (SBS), phase conjugation resonator, primary resonator's stability, *Q*-switch effect