

文章编号: 0253-2239(2004)04-495-4

# 钇铝石榴石对撞增强型相位共轭腔的研究\*

屈 军<sup>1,2</sup> 张为俊<sup>1</sup> 高晓明<sup>1</sup> 刘安玲<sup>1</sup> 黄 伟<sup>1</sup> 裴世鑫<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)  
(<sup>2</sup> 芜湖师范专科学校物理系, 芜湖 241008)

**摘要:** 报道了一种新型的相位共轭腔——对撞型钇铝石榴石受激布里渊散射相位共轭激光腔, 实验结果发现该腔具有较低的启动阈值和 100 mJ 以上的输出能量, 它能输出稳定的 20 ns 左右的自调 Q 脉冲, 发散角为 1.3 mrad。在一定范围内, 抽运电压越高, 输出脉宽越窄; 相位共轭腔越长, 输出脉宽越宽; 聚焦透镜对输出脉宽也有影响, 焦距越短, 脉宽越窄; 焦距与介质池相对长点, 输出能量相对高, 远场发散角相对小些。实验给出了不同条件下的输出能量、脉冲宽度和光束发散角的情况。

**关键词:** 非线性光学; 相位共轭; 受激布里渊散射; 对撞腔

中图分类号: O437.2 文献标识码: A

## The Investigation of Colliding-Enhanced YAG Phase-Conjugate Ring Resonator

Qu Jun<sup>1,2</sup> Zhang Weijun<sup>1</sup> Gao Xiaoming<sup>1</sup> Liu Anling<sup>1</sup> Huang Wei<sup>1</sup> Pei Shixin<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)  
(<sup>2</sup> Department of Physics, Wuhu College, Wuhu 241008)

(Received 7 January 2003; revised 10 June 2003)

**Abstract:** A novel colliding-enhanced cavity is reported. It has low threshold and energy output of 100 mJ. Self Q-switched pulse duration is 20 ns, with 1.3 mrad of the angle of divergence. In some extent, the higher the pump voltage is, the narrower the output pulse widths; The longer the length of phase conjugate resonator, the wider the pulse widths; The shorter the focal length of the lens, the narrower the pulse widths; the longer the cell and focal length, the higher the output energy and the smaller the angle of divergence. The results of pulse widths and output energies and the angle of divergence in different conditions are given.

**Key words:** nonlinear optics; phase conjugation; stimulated Brillouin scattering; colliding-enhanced resonator

## 1 引 言

普通受激布里渊散射(SBS)相位共轭腔由于启动阈值一般都比较高而且输出能量较低, 还会出现相位跃变现象<sup>[1]</sup>, 严重影响了它的实际应用。如何降低受激布里渊散射相位共轭腔的启动阈值以及如何提高输出光束的质量一直是人们关心的课

题<sup>[2,3]</sup>。在布里渊介质中, 如果两束抽运光场在介质中对撞相遇, 就会相互干涉, 形成的密度光栅对抽运光具有很强的分布反射作用, 与此同时, 它们还伴随产生各自的受激布里渊散射光, 即斯托克斯和反斯托克斯光场。众多频率略有差异的光场通过布里渊介质而相互影响、相互耦合, 很容易导致各透射光场的时间波动性, 甚至混沌行为<sup>[4~6]</sup>。光谱观测表明, 两束对撞光波相互作用后, 在任一方向的总透射光场中, 包括透过介质的抽运光, 以及较弱的受激布里渊散射反斯托克斯光和很强的受激布里渊散射后

\* 863 激光技术创新基金(20030509)资助课题。

E-mail: qujun@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2003-01-07; 收到修改稿日期: 2003-06-10

向斯托克斯光成分<sup>[7]</sup>。另有理论和实验表明,对撞传播的两束光波在相互作用时,在一定的条件下可将受激布里渊散射阈值降低好几倍<sup>[8]</sup>,这很有利于其在受激布里渊散射相位共轭技术中的应用。我们在钇铝石榴石激光器上设计并运行了对撞增强型受激布里渊散射相位共轭腔,国内外文献至今尚无报道。实验观测到这种新型的共轭腔具有较低的启动阈值和相当高的输出能量,并且能输出稳定的 ns 量级自调 Q 激光脉冲。

### 2 实验装置

我们设计的对撞增强型钇铝石榴石激光相位共轭谐振腔如图 1 所示,  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  皆为中心波长为  $1.06 \mu\text{m}$  全反镜,  $F$  为聚焦透镜,钇铝石榴石激光棒长约  $120 \text{ mm}$ 、口径约  $8 \text{ mm}$ ,氙灯抽运。  $BS_1$  为中心频率  $1.06 \mu\text{m}$  的  $45^\circ$  半透半反分束镜。对撞型谐振腔在自由运转条件下,静态激光的谐振路径有两路,即  $M_1 \rightarrow \text{YAG} \rightarrow BS_1$  (透射)  $\rightarrow M_3 \rightarrow \text{SBS-cell} \rightarrow M_2 \rightarrow BS_1$  (反射)  $\rightarrow \text{YAG} \rightarrow M_1$  和  $M_1 \rightarrow \text{YAG} \rightarrow BS_1$  (反射)  $\rightarrow M_2 \rightarrow \text{SBS-cell} \rightarrow M_3 \rightarrow BS_1$  (透射)  $\rightarrow \text{YAG} \rightarrow M_1$ ,它们在第二次途经  $BS_1$  时分别透射和反射部分激光,作为对撞型起始腔的耦合输出。

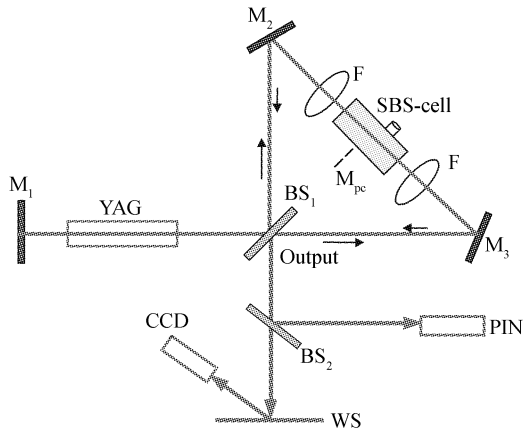


Fig. 1 Experimental arrangement. WS: wood screen;  $BS_1, BS_2$ : beam splitter

图中  $M_2$  和  $M_3$  以  $BS_1$  为对称面放置,受激布里渊散射池位于  $M_2$  与  $M_3$  之间的光路中点,两路谐振光的光路总长相同,且能同时到达受激布里渊散射池而对撞相遇,两透镜在受激布里渊散射池子中点共焦。当腔内静态激光强度达到一定阈值时,两路静态激光在受激布里渊散射池中对撞相互作用,产生前后向的相位共轭散射光,此时受激布里渊散射池便成为两面反射的相位共轭镜  $M_{pc}$ 。于是,

对撞型起始腔即刻转变为对撞型相位共轭腔,它也是由两个共轭腔复合而成,它们的谐振光路分别为:  $M_1 \rightarrow \text{YAG} \rightarrow BS_1$  (透射)  $\rightarrow M_3 \rightarrow M_{pc}$  (共轭反射)  $\rightarrow M_3 \rightarrow BS_1$  (透射)  $\rightarrow \text{YAG} \rightarrow M_1$  和  $M_1 \rightarrow \text{YAG} \rightarrow BS_1$  (反射)  $\rightarrow M_2 \rightarrow M_{pc}$  (共轭反射)  $\rightarrow M_2 \rightarrow BS_1$  (反射)  $\rightarrow \text{YAG} \rightarrow M_1$ ,它们在第二次途经  $BS_1$  时分别反射和透射部分激光,作为对撞型相位共轭腔的耦合输出。在这个过程初期,由于腔内的衍射、受激布里渊散射池及其它因素造成的损耗,使初始腔的  $Q$  值较低;当光强增长到超过受激布里渊散射阈值时,由于反射率的突增、腔长的减小以及对相位畸变的抵消造成腔内  $Q$  值突增。受激布里渊散射池在这时既起了腔镜的作用,又起了  $Q$  开关的作用。脉冲波形用 TDS220 数字示波器采集,用 CCD 拍摄远场 ( $3.0 \text{ m}$ ) 的光斑,用 R-938 型能量计测量输出能量。

### 3 实验结果与分析

首先我们用焦距为  $6.5 \text{ cm}$  聚焦透镜,将光束聚焦到  $11 \text{ cm}$  长的受激布里渊散射池中(介质为丙酮)进行实验。实验结果发现抽运电压在  $550 \text{ V}$  时, ns 量级单脉冲输出较不稳定,此时形成的相位共轭腔长为  $169 \text{ cm}$ 。增大抽运电压大于  $600 \text{ V}$  时,单脉冲输出较为稳定。随抽运电压的升高,输出单峰的脉宽减小。如果透镜的焦距为  $10 \text{ cm}$ ,其他条件不变(相位共轭腔长为  $169 \text{ cm}$ ),当抽运电压达到  $600 \text{ V}$  时,也有稳定的单峰输出,同样输出脉宽随抽运电压的升高而减小,但相对于焦距为  $6.5 \text{ cm}$  的透镜,脉宽相对较宽,见图 2。这与文献[9]计算受激布里渊散射脉宽的公式

$$\tau \sim \frac{\lambda}{2n^3 p_{12}} \left( \frac{\rho_0 \nu_0}{P} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

(式中  $\lambda$  为抽运光波长,  $n$  为散射介质折射率,  $p_{12}$  为弹光系数,  $\rho_0$  为散射介质的平均密度,  $\nu_0$  为声速,  $P$

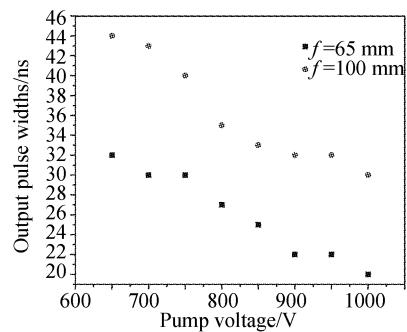


Fig. 2 The relationship of the output pulse widths and pump voltage

为抽运光的功率密度)相吻合。因为焦距长,抽运功率密度  $P$  就小,输出脉宽相对就宽了。同样,对于一定的焦距,抽运电压升高了,功率密度加大,输出脉宽减小。

当聚焦透镜焦距为 6.5 cm,介质仍为丙酮,维持抽运电压在 750 V,改变共轭腔的长度,相位共轭腔长从 200 cm 到 160 cm,每隔 5 cm 测量一次,观测到输出脉宽从共轭腔长 200 cm 时的 40 ns 减小到 30 ns。将透镜焦距换为 10 cm 时,其他条件不变,测得输出脉宽从 45 ns 减小到 35 ns,见图 3。是因为腔长增大后,腔的损耗增大,反转粒子数减少,同时粒子在腔中往返时间增大,输出的脉宽加宽了。根据文献[10],输出脉宽  $\Delta t_{\text{FWHM}}$  为

$$\Delta t_{\text{FWHM}} = \tau_{\text{pc}} \frac{n_i - n_f}{n_i - n_{\text{th}} [1 + \ln(n_i/n_{\text{th}})]}, \quad (2)$$

式中  $\tau_{\text{pc}} = 2L_{\text{pc}}/c\epsilon_{\text{pc}}$  为相位共轭腔内光子寿命,  $L_{\text{pc}}$  为相位共轭腔的长度,  $c$  为真空中光速,  $\epsilon_{\text{pc}}$  为起始腔向完全相位共轭腔转变时经历的非完全相位共轭腔的腔损耗。 $\tau_{\text{pc}}$  与相位共轭腔腔长及腔内的总损耗大小有关;  $n_{\text{th}}$  为共轭腔能形成激光谐振的阈值反转粒子数密度,而  $n_i$ 、 $n_f$  为  $Q$  开关过程中,调  $Q$  脉冲形成之初和之后的激光上下能级反转粒子数密度。可见相位共轭腔  $L_{\text{pc}}$  越长,输出的激光脉宽越宽,这与实验完全一致。但其发散角减小了。因为聚焦透镜的焦距越长,焦斑越大,抽运功率密度越小,导致受激散射光的脉宽增大,发散角减小,这同样可以从上面文献[9]公式得到说明。

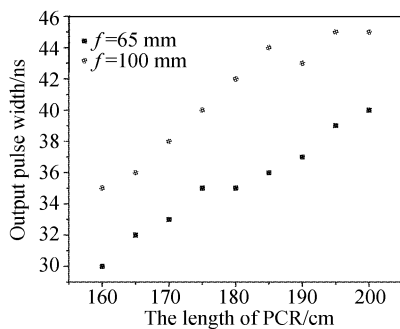


Fig. 3 The relationship of output pulse widths and the length of PCR

此外,实验还利用 CCD 摄像头记录了对撞型起始腔的静态光(抽运电压为 500 V 时)和自调  $Q$  激光(抽运电压为 850 V 时)照射到距输出耦合分束镜 BS 约 3.0 m 远的白纸屏上,借助 CCD 照片进行相对地测算,静态(3.0 mrad)的光束发散角比动态(1.3 mrad)大了一倍多。如图 4(a)、图 4(b)所示。这也表明对撞增强型激光相位共轭腔不仅能输出窄

脉冲调  $Q$  激光,而且也能有效地减小光束发散角,改善光束质量。同时我们观测到透镜焦距和介质池的长短对输出光的发散角有影响:焦距和介质池相对长,发散角相对小;焦距和介质池相对短,发散角相对大,见图 5。

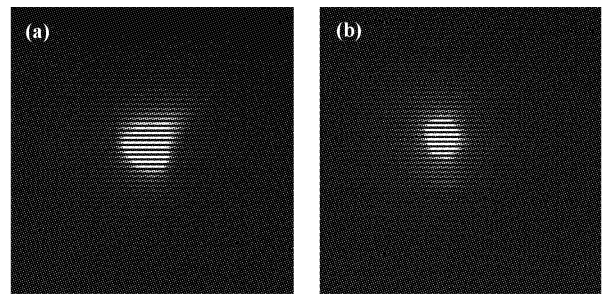


Fig. 4 The profile of far-field spots

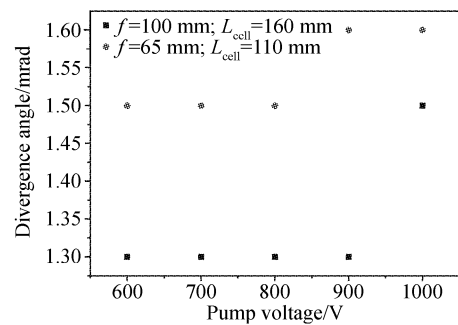


Fig. 5 The relationship of the divergence angle and pump voltage

这种腔型的另外一个优点就是耦合输出能量较高,输出能量有几十毫焦。实验测得不同焦距下输出能量与氙灯抽运电压之间的关系如图 6(a)。对焦距为 6.5 cm 的透镜,开始随着抽运电压的升高,输出的能量变大。当抽运电压在 850 V 以上时,输出能量变化不大,且有一定的波动,但是长焦距(焦距为 10 cm)的输出能量随抽运电压的升高而稳定升高。这是由于对短焦距透镜,随着抽运电压升高,抽运功率密度加大,介质出现光感应击穿造成漏闪现象的原因[11]。随着焦距的增加,光感应击穿的阈值越来越高,抽运光脉冲在布里渊介质中所走的路程也越长,后向受激布里渊散射得到更大的增益,因此所需后向受激布里渊散射的阈值光强也越低。这样就消去了相位共轭波与其它非线性效应在布里渊介质中的竞争效应,能够获得高质量的受激布里渊散射相位共轭波,输出的能量也稳定多了,见图 6(a)。若两透镜不共焦,不能形成对撞型相位共轭腔时,输出能量明显下降,图 6(a)也给出了两焦距为 6.5 cm 透镜,当它们焦点相距 2 cm 时的输出能量。

实验还观测到对相位共轭腔长为 169 cm, 聚焦透镜焦距为 10 cm 时, 介质池的长短对输出能量的大小也有影响: 池长的输出能量相对高, 池短的输出能量

相对低, 这是由于池长, 后向受激布里渊散射得到更大的增益的原因。具体见图 6(b)。

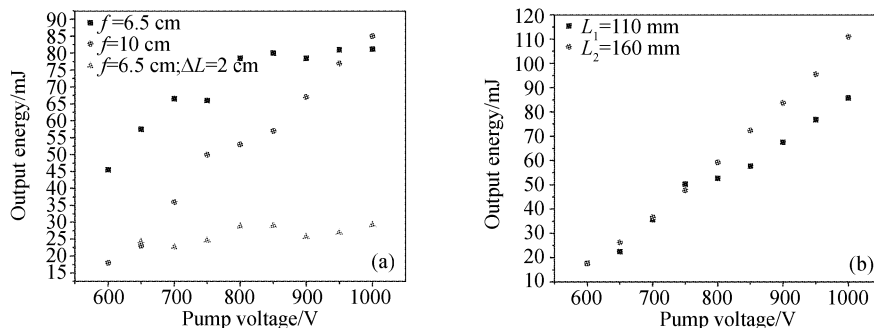


Fig. 6 The relationship of pump voltage and output energy

**小结** 对撞增强型相位共轭腔是一种新型的具有较低启动阈值, 又有较高输出能量的腔, 它能输出稳定的自调 Q 脉冲。输出脉宽随抽运电压的升高而变窄; 相位共轭腔越长, 输出脉宽越宽; 聚焦透镜在一定范围内对输出脉宽也有影响, 焦距越短, 脉宽越窄。输出能量和发散角与透镜的焦距、介质池的长短有关: 焦距与介质池长点, 输出能量相对高, 远场发散角相对小些。两透镜必须严格共焦, 否则输出能量很低。当抽运电压过高时, 介质中会出现明显的光学击穿现象, 严重影响受激布里渊散射共轭度, 导致脉宽变宽, 能量下降, 发散角增大, 同时出现多峰现象。如何进一步压缩对撞腔的脉宽, 增大其输出能量, 减小输出光束发散角, 提高光束的整体质量, 这些我们仍在研究之中。

感谢葛传文博士给予的帮助和有益讨论。

### 参 考 文 献

- 1 Yang Ailing, Yang Jingguo, Ding Wei. Phase jump in the process of stimulated Brillouin scattering. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2001, **A28**(8):732~734 (in Chinese)
- 2 Ge Chuanwen, Zhang Weijun, Chen Changshui *et al.*. Experimental investigation of broadband laser's SBS based on frequency-band-dispersing method. *Acta Optica Sinica*

- (光学学报), 2001, **21**(12):1454~1457 (in Chinese)
- 3 Ding Yingchun, Lu Zhiwei, He Weiming. Influence of encounter time on Brillouin amplification. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7):784~788 (in Chinese)
- 4 Silberberg Y, Joseph I B. Instabilities self-oscillation and chaos in a simple nonlinear optical interaction. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, **48**(22):1541~1543
- 5 Narum P, Gaeta A L, Skeldon M D *et al.*. Instabilities of laser beams counter-propagating through a Brillouin-active medium. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1988, **5**(3):623~628
- 6 Gaeta A L, Skeldon M D, Boyd R W *et al.*. Observation of instabilities of laser beams counterpropagating through a Brillouin medium. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1989, **6**(9):1709~1713
- 7 Kulagin O, Pasmanik G A, Gaeta A L *et al.*. Observation of Brillouin chaos with counterpropagating laser beams. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1991, **8**(10):2155~2157
- 8 Bespalov V I, Bubis E L, Kulagina S N *et al.*. Stimulated Brillouin scattering in a field of opposite light waves. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1982, **12**(12):1544~1547
- 9 Hon D T. Pulse compression by stimulated Brillouin scattering. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(12):516~518
- 10 Koechner W. *Solid-State Laser Engineering*. Springer Series in Optical Sciences, 1995. 452~455
- 11 Liu Qiang, Ju Youlun, Wang Yuezhu *et al.*. Stimulated Brillouin scattering phase-conjugate resonator and internal optical parametric oscillator. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(8):1090~1093 (in Chinese)