

# 受激布里渊散射相位共轭腔及 腔内光学参量振荡器\*

柳 强 鞠有伦 王月珠 于 欣 姚宝权 陈德应 王 骐

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 可调谐激光技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

**摘 要** 利用受激布里渊散射相位共轭特性和  $Q$  开关特性组成 Nd:YAG 激光谐振腔, 代替传统激光器全反镜和调  $Q$  装置, 获得能量 100 mJ、脉宽 13 ns 的线偏振相位共轭激光输出, 相应的激光器总体转换效率为 0.47%, 同时将单共振 KTP 光学参量振荡器置入腔内, 得到波长 1.57  $\mu\text{m}$ 、能量 15 mJ 的参量振荡激光, 实验上证实了受激布里渊散射相位共轭腔内光学参量振荡器运行的可行性。

**关键词** 受激布里渊散射相位共轭镜, 光学参量振荡器,  $Q$  开关。

## 1 引 言

受激布里渊散射(SBS)现象被发现以来<sup>[1, 2]</sup>, 人们对其相位共轭特性和  $Q$  开关特性进行了深入的、广泛的研究。利用相位共轭特性改善激光光束质量, 利用  $Q$  开关特性获得调  $Q$  激光输出, 压缩激光脉宽等方面已有不少文章报道<sup>[3~6]</sup>。一般的受激布里渊散射相位共轭腔只取代调  $Q$  装置, 受激布里渊散射的建立还依赖于激光原有的谐振腔。本文是将受激布里渊散射的相位共轭特性和  $Q$  开关特性应用于重复频率 1 Hz 的 Nd:YAG 激光器上, 以丙酮为散射介质, 组成了一种新型的激光谐振腔, 从而代替传统激光器全反镜和调  $Q$  装置, 获得较高功率的线偏振相位共轭激光输出。并将单共振 KTP 光学参量振荡器置入腔内, 获得 15 mJ、1.57  $\mu\text{m}$  参量振荡激光输出, 还将受激布里渊散射相位共轭腔的输出镜和光学参量振荡器谐振腔输出镜及滤光片同一化, 使得受激布里渊散射相位共轭腔内光学参量振荡器的结构更加紧凑、小型, 便于工程上的应用。

## 2 受激布里渊散射相位共轭腔的实验研究

### 2.1 实验装置

如图 1 所示, 受激布里渊散射相位共轭腔是由受激布里渊散射相位共轭镜(SBS PCM)和输出镜 M 组成, 腔长 45 cm, 受激布里渊散射池长 14 cm, 池的端面镀有 1.06  $\mu\text{m}$  激光增透膜; 透镜焦距 10 cm, 距池的前端面 3 cm; 输出镜  $R = 50\%$ ; YAG 棒的尺寸为  $\phi 6 \times 90 \text{ mm}$ ,

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号 69778006)。

收稿日期: 1998-07-20; 收到修改稿日期: 1998-10-08

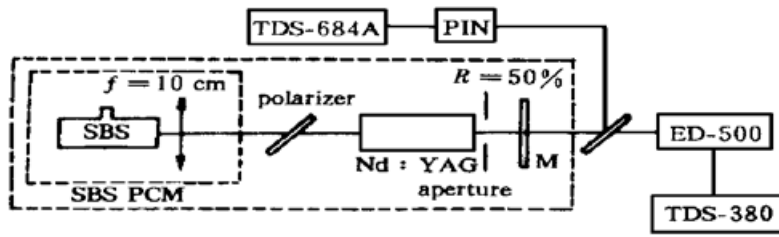


Fig. 1 Experimentai setup of SBS phase-conjugate resonator

端面未镀膜; 聚光腔为单灯泵浦紧包腔。脉冲波形由光电二极管(PIN 管)配合 TDS-684A 数字存储示波器测量, 其综合响应时间小于 1 ns, 输出能量由 ED-500 能量计测得。选丙酮为散射介质, 是因其增益系数较大, 且对  $1.06 \mu\text{m}$  的光波吸收较小。实验中也曾用乙醇和  $\text{CCl}_4$  作了对比实验, 结果表明: 乙醇的增益系数较小, 且对  $1.06 \mu\text{m}$  的光波吸收较大, 导致受激布里渊散射的阈值较高。而  $\text{CCl}_4$  的阈值较低, 但由于随注入能量的增加相位共轭腔输出能量变化不大, 使得相位共轭腔输出能量较小。

## 2.2 调 Q 脉冲的产生过程

受激布里渊散射相位共轭腔调 Q 脉冲的产生与晶体电光调 Q 和染料调 Q 原理基本相同, 都是使激光腔内的 Q 值瞬间产生突变。关于受激布里渊散射相位共轭腔内的 Q 突变可作如下的描述: 当受激布里渊散射相位共轭腔建立前, 由于透镜与输出镜之间所成腔的静态输出激光功率没有达到受激布里渊散射的阈值, 腔内的损耗很大, 反转粒子数密度逐渐增加。受激布里渊散射发生后, 其后向散射相当于一个相位共轭镜(PCM), 此时腔内的损耗突然变小, 上能级粒子迅速向下能级跃迁, 产生调 Q 巨脉冲输出。这种调 Q 脉冲输出功率的大小与腔内的损耗大小有密切关系。如果受激布里渊散射发生前, 腔内的损耗越大, 受激布里渊散射发生后, 腔内的损耗越小, 则受激布里渊散射相位共轭腔的阈值越高, 输出单脉冲功率越高。实验中, 当透镜与输出镜之间成腔, 静态输出能量为 54.6 mJ 时, 达到了受激布里渊散射的阈值, 其相位共轭腔便建立起来, 明显的特征是伴随有声响效应和闪光效应。这种声响效应和闪光效应对输出的影响不大。输出脉冲波形如图 2 所示(四次叠加结果), 其稳定性还有待于进一步提高。有时脉冲波形还会出现调制现象(多尖峰结构), 原因是由于布里渊频移产生各种频率的光波都在激光的增益线宽之内, 在激光振荡过程中都获得增益造成的。受激布里渊散射相位共轭腔调 Q 脉冲的宽度不仅与受激布里渊散射介质的本身特性(如介质的增益系数和吸收系数、声学声子寿命等)有关, 还与透镜的焦距长短以及焦点在受激布里渊散射池中的位置有很大的关系, 这需要以后进一步研究。

## 2.3 能量输出特性

受激布里渊散射相位共轭腔输出能量随注入能量的变化曲线和能量的采样如图 3、图 4 所示, 随注入能量的增加相位共轭腔输出能量变化不大, 输出能量的稳定度却有所下降。注入能量增加到一定值以后出现漏闪现象, 其原因可能由于能量过高, 散射介质被击穿造成的。在注入能量超过阈值不多的条件下, 输出能量的起伏小于  $\pm 2\%$ , 无漏闪现象。对于这种随注入能量的增加, 漏闪也增多的现象还不能给以完全解释, 但随注入能量的增加相位共轭腔输出能量变化不大的原因, 可以从两方面加以考虑: 一方面由于注入能量增加自激激光的功率密度增加非常小, 所以受激布里渊散射相位共轭镜的反射率变化也不明显; 另一方面随

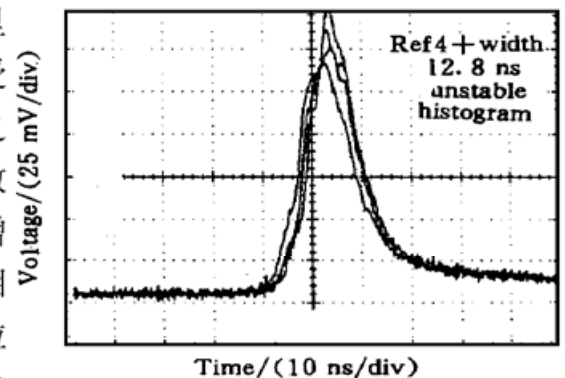


Fig. 2 The Q-switch pulse distribution of SBS phase-conjugate resonator

注入能量的增加反转粒子数密度有趋于饱和的趋势, 当产生自激达到受激布里渊散射的阈值时, 注入能量的增加并没使工作介质(YAG 棒)的反转粒子数得到极大增多。

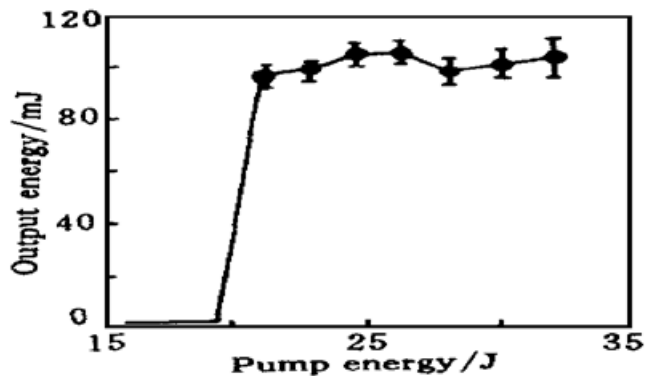


Fig.3 Output energy of phase-conjugate resonator versus pump energy

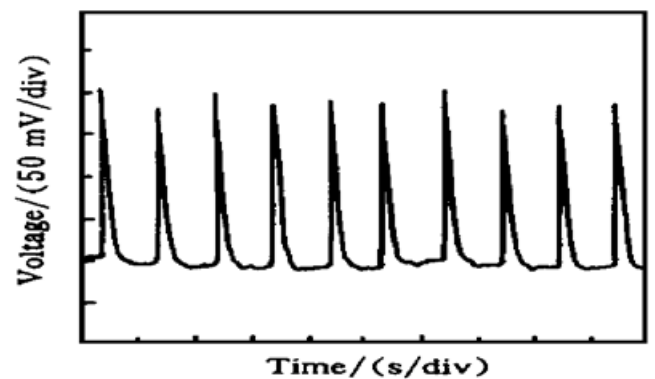


Fig.4 The sample of output energy of SBS phase-conjugate resonator

### 3 受激布里渊散射相位共轭腔内 KTP 光学参量振荡器

#### 3.1 受激布里渊散射相位共轭腔内光学参量振荡器分析

内腔光学参量振荡器(IOPO)虽然早在 70 年代初期就有报道<sup>[7, 8]</sup>, 但受多种因素限制, 相对于外腔光学参量振荡器开展的研究要少得多。最近有一些关于内腔光学参量振荡器的报道<sup>[9, 10]</sup>, 它已被成功应用于激光雷达扫描仪上。还有采用双光学参量振荡器组合调谐来实现红外波段的扩展, 其基本方法是用内腔光学参量振荡器获取近红外光源再泵浦红外参量振荡晶体(ZnGeP<sub>2</sub>、AgGaSe<sub>2</sub> 等)获得更长波段参量振荡输出。这也是光学参量振荡器发展的一个重要方向。作为内腔光学参量振荡器有如下优点:

1) 激光器腔内的功率密度比腔外的功率密度高, 其比例关系为:  $I_{out} = (1 - R)I_{in}$ , 功率密度高有利于提高光学参量振荡器的转换效率。

2) 泵浦光共线往返泵浦参量振荡晶体, 补偿了泵浦光在晶体中走离效应, 且起到循环泵浦参量振荡晶体的作用, 理论上应该获得较高的转换效率。

3) 内腔光学参量振荡器结构比较紧凑, 易于小型化、全固化, 便于工程上的应用, 所以对其进行必要的理论和实验研究是非常有意义的。

受激布里渊散射相位共轭腔内光学参量振荡器除了具有上述优点外, 还有以下长处:

1) 受激布里渊散射相位共轭腔内激光振荡过程中, 受激布里渊散射相位共轭镜后向散射为泵浦波的相位共轭波, 补偿由于各种象差元件(YAG 棒、参量振荡晶体增益介质的不均匀性和光学参量振荡器谐振腔镜等光学元件的质量)引起的波前畸变, 原理上提高了泵浦光的光束质量。

2) 虽然光学参量振荡器的放入增加了受激布里渊散射相位共轭腔内的损耗, 增大了它的起振阈值, 但同时也使工作物质积累更多的反转粒子, 对相位共轭腔输出的单脉冲功率影响不大。

3) 受激布里渊散射相位共轭镜代替了调 Q 晶体和复杂的 Q 开关电路, 降低了成本, 简化了结构, 而且受激布里渊散射相位共轭镜对激光波长不敏感。

#### 3.2 实验装置

实验装置如图 5 所示。实验中的 KTP 晶体为 x 轴切割, 保证有效非线性系数最大, 晶体

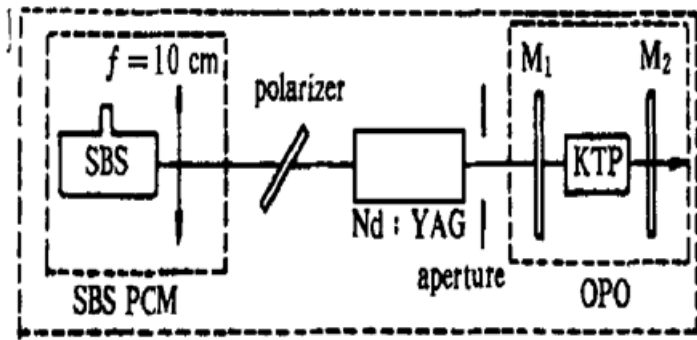


Fig. 5 Experimental setup of internal optical parametric oscillator in SBS phase-conjugate resonator

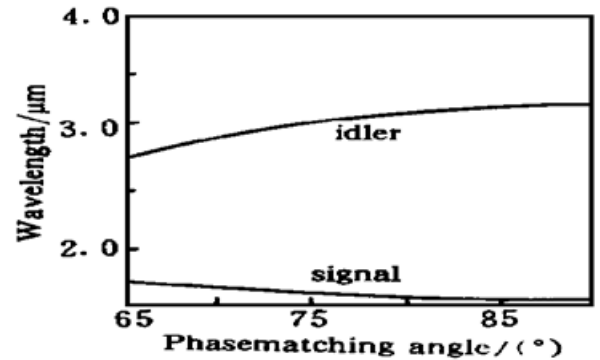


Fig. 6 The KTP phase-matching function

尺寸为  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ，采用 I 类相位匹配，其理论相位匹配曲线如图 6 所示。信号光的波长为  $1.57\ \mu\text{m}$ ，相应的闲频光的波长为  $3.2\ \mu\text{m}$ 。从图中可以看出其信号光的调谐范围较窄，但这种定波长光学参量振荡器具有阈值低、转换效率高等优点，而且  $1.57\ \mu\text{m}$  激光对人眼无伤害，对烟、雾的穿透能力强，是大气的第一个红外窗口，可广泛用于激光测距和目标指示系统上。实验中光学参量振荡器谐振腔的腔长为  $25\text{ cm}$ ， $M_1$  为  $1.57\ \mu\text{m}$  全反、 $1.06\ \mu\text{m}$  高透， $M_2$  的前表面对  $1.57\ \mu\text{m}$  的反射率  $R = 80\%$ ， $1.06\ \mu\text{m}$  高透， $M_2$  的后表面对  $1.57\ \mu\text{m}$  全透， $1.06\ \mu\text{m}$  高反。这样  $M_2$  既是相位共轭腔的输出镜又是光学参量振荡器谐振腔的输出镜，还起到滤光片的作用。选用这种结构主要是基于光学参量振荡器的小型化、全固化为出发点。判断受激布里渊散射相位共轭腔是否形成主要靠辨别是否有声响效应和闪光效应，或者在腔内加一片  $45^\circ$  角、 $1.06\ \mu\text{m}$  部分输出镜，组成倒空腔，测量输出便知是否成腔。成腔后固定  $M_1$ ，调节  $M_2$  使光学参量振荡器成腔至输出为最大。

### 3.3 能量输出特性

输出能量用数字存储示波器获得的采样如图 7 所示，平均输出能量  $15\text{ mJ}$ ，在受激布里渊散射相位共轭腔比较稳定且无漏闪的情况下，内腔光学参量振荡器的起伏小于  $\pm 5\%$ 。在光学参量振荡器腔完全失谐的条件下，输出能量几乎探测不到，说明腔内并没有形成有效的单程光参量放大 (OPA)。在调节光学参量振荡器成腔的过程中，还发现光学参量振荡器对失谐表现得不敏感。效率下降比较缓慢，只是能量输出起伏较大。这一点与外腔光学参量振荡器区别较大。

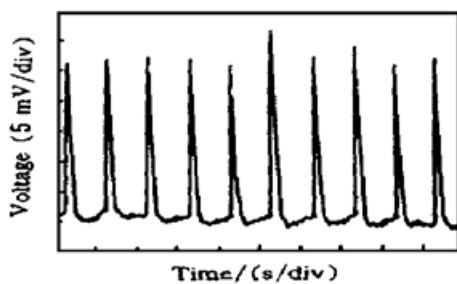


Fig. 7 The sample of KTP OPO energy output

**结束语** 本文通过对受激布里渊散射相位共轭腔的实验研究，实现了较大能量、共轭线偏振动态激光输出，并从理论上对受激布里渊散射相位共轭腔输出的调  $Q$  和能量输出特性给予了定性的解释。实验中将光学参量振荡器置入相位共轭腔内，获得了参量振荡激光输出，完全证实了相位共轭腔内光学参量振荡器运行的可行性。在实验中还发现虽然受激布里渊散射相位共轭腔能补偿腔内像差元件引起的波前畸变，但这种代替传统激光器全反镜和调  $Q$  装置的受激布里渊散射相位共轭腔的技术还未成熟，使其输出和光学参量振荡器的输出并没有达到预想的效果。作者相信，随着这种受激布里渊散射相位共轭腔研究的不断深入和不断的完

善, 各种新的优质的受激布里渊散射介质不断的出现, 受激布里渊散射相位共轭腔会有更广阔的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] Chiao R Y, Townes C H, Stoicheff B P. Stimulated Brillouin scattering and coherent Generation of intense hypersonic waves. *Phys. Rev. Lett.*, 1964, **12**: 592~ 595
- [2] Zel'Dovich B Y, Poporichev V I, Ragul'Sriy V V. Connevtion between the wave fronts of reflected and exciting light in stimulated mandel stimulated Brillouin scattering. *JETP Lett.*, 1972, **15**(2): 109~ 112
- [3] Rockwe D A. A review on phase-conjugate solid-state asers. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **QE-24**(6): 1124~ 1140
- [4] 姚敏言, 汤剑鸣. 利用受激布里渊散射  $Q$  开关的研究. *光学学报*, 1992, **12**(2): 144~ 147
- [5] Boyd R W. *Nonlinear Optics*, United Kingdom, Academic Press Inc, 1992. 325~ 349
- [6] Hui Meng, Eichler H J. Nd·YAG laser with a phase-conjugating mirror based on stimulated Brillouin scattering in SF<sub>6</sub> gas. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(8): 569~ 571
- [7] Ammann E O, Yarborough J M, Oshman M K *et al.*. Efficient internal optical parametric oscillator. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, **16**(8): 309~ 312
- [8] Falk J, Yarborough J M, Ammann E O. Internal optical parametric oscillator. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1971, **QE-7**(7): 359~ 368
- [9] Greiner U J, Klingenberg H H. Picosecond intracavity optical parametric oscillator. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(1): 43~ 45
- [10] Lavi R, Englander A, Lallouz R. Highly efficient low-threshold tunable all-solid-state intracavity optical parametric oscillator. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(11): 300~ 302

## Stimulated Brillouin Scattering Phase-Conjugate Resonator and Internal Optical Parametric Oscillator

Liu Qiang    Ju Youlun    Wang Yuezhu    Yu Xin

Yao Baoquan    Cheng Deying    Wang Qi

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Opto-Electronics,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(Received 20 July 1998; revised 8 October 1998)

**Abstract** Making use of optical phase conjugation effect and  $Q$ -switch effect in stimulated Brillouin scattering (SBS), a Nd·YAG laser with phase-conjugate resonator is developed. By this way, the reflecting mirror and  $Q$ -switch in traditional lasers are not used. The laser output is 100 mJ, and the pulse width is 13 ns. The corresponding total converse efficiency of the laser is 0.47%. In addition, a KTP optical parametric oscillator was inserted into the phase-conjugate resonator, the optical parameter oscillator (OPO) output wavelength of 1.57  $\mu\text{m}$  and the output energy of 15 mJ can be obtained. The result indicates that the OPO in SBS phase conjugation resonator is feasible.

**Key words** stimulated Brillouin scattering phase-conjugate mirror, optical parameter oscillator,  $Q$ -switch.