

文章编号: 0258-7025(2003)09-0788-03

# 受激布里渊散射相位共轭激光器 自调 Q 机理的探讨

葛传文, 张为俊, 高晓明

(中国科学院安徽光学精密机械研究所激光光谱学开放实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 深入分析了从起始腔向相位共轭腔转变时, 腔损耗的突变过程。结合速率方程理论和快 Q 开关特点, 探讨了受激布里渊散射(SBS)相位共轭激光器的自调 Q 机理, 给出了自调 Q 脉冲脉宽的估算公式。估算值与实验值基本相符。

**关键词** 非线性光学; SBS 相位共轭激光器; 腔损耗突变; 快 Q 开关; 速率方程理论

**中图分类号** O 437.1 **文献标识码** A

## Self-Q-switching Mechanism of SBS Phase-conjugation Laser Resonator

GE Chuan-wen, ZHANG Wei-jun, GAO Xiao-ming

(Laser Spectroscopy Open Laboratory, Anhui Institute of Optics & Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** The revulsion of resonator losses during converting from the starting to the SBS phase-conjugation is carefully analyzed. Based on rate equation theory and quick Q-switching characteristic, the self-Q-switching mechanism of SBS phase-conjugation laser resonator is discussed, and a formula for estimating the Q-switching pulsewidth is given.

**Key words** nonlinear optics; SBS phase-conjugation laser resonator; revulsion of resonator losses; quick Q-switching; rate equation theory

## 1 引 言

所谓调 Q 就是使谐振腔内的损耗发生由高向低的突变, 或者说使腔的 Q 值发生由低向高的突变。受激布里渊散射(SBS)相位共轭谐振腔, 除了能改善输出激光的光束质量外, 还有一个突出的优越性, 就是能实现自调 Q 而获得窄的激光脉冲。这种被动式 Q 开关与主动式的电光、声光等 Q 开关相比, 具有简单方便、不需附加调 Q 电源系统等特点; 与传统的可饱和吸收体被动 Q 开关相比, 它不受激光波长的限制, 可用于各种不同波长的激光谐振腔中, 是实现各种新波段激光器调 Q 运转的重要技术途径。1967 年, D. Pohl 就已观察到 SBS 相位共轭谐振腔的自调 Q 现象<sup>[1]</sup>, 但当时并没有引起普遍的关注, 直到

SBS 的自动相位畸变补偿特性发现之后, 才开始有大量的科研人员对其进行广泛而深入的研究。已有部分文献对 SBS 相位共轭腔的自调 Q 机理作了分析和讨论<sup>[2,3]</sup>。这里, 作者试图再作一些更深入的探讨。

## 2 从起始腔向相位共轭腔转变时的腔损耗突变过程分析

图 1 所示为最简单的带 SBS 池的激光谐振腔, 其中  $M_1$  (高反射率平面镜) 和  $M_2$  (低反射率输出耦合镜) 构成起始腔, 腔光程长度为  $L_p$ , 两个透镜  $F$  组成共焦聚焦系统, 它们的共同焦点位于 SBS 池的中心虚线位置。随着起始腔内自由振荡激光强度的不

收稿日期: 2002-04-27; 收到修改稿日期: 2002-07-08

**作者简介:** 葛传文(1968—), 男, 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士, 主要从事非线性光学相位共轭及激光技术的研究。现工作单位: 炮兵学院, E-mail: gcwen@hotmail.com

断增强,焦点处形成的 SBS 相位共轭镜  $M_{pc}$  将取代  $M_1$  而与  $M_2$  构成 SBS 相位共轭谐振腔,其光程长度为  $L_{pc}$ 。激光在起始腔中往返一周所经受的损耗包括路程上的所有光学元件的吸收、散射、衍射及耦合输出等的总和,记作  $\epsilon_p$ ;而当 SBS 相位共轭谐振腔形成之后,激光仅在共轭镜  $M_{pc}$  与输出耦合镜  $M_2$  之间往返,其往返一周所经受的总损耗记作  $\epsilon_{pc}$ 。

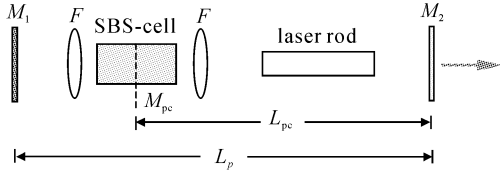


图 1 带 SBS 池的激光谐振腔示意图

Fig. 1 Schematic of laser resonator with SBS-cell

下面分析从起始腔转变到完全相位共轭腔的过程中,腔损耗  $\epsilon$  的变化情况,这是调 Q 过程的关键。通常  $\epsilon$  可表示为

$$\epsilon = -\ln R_2 + \delta - \ln R_1^*$$

式中,右边第一项为输出耦合损耗项, $R_2$  表示输出耦合镜  $M_2$  的反射率;第二项  $\delta$  为腔内光学元件的吸收、散射、衍射损耗之和;第三项为可变损耗项,它可引起 Q 值的突变, $R_1^*$  在相位共轭镜  $M_{pc}$  启动之前表示镜  $M_1$  的反射率  $R_1$ ,在共轭腔完全形成之后则表示  $M_{pc}$  的饱和反射率  $R_{pc}$ (在理想 SBS 情况  $R_{pc} \geq R_1$ )。将起始腔损耗与完全相位共轭腔损耗分开表示为

$$\epsilon_p = -\ln R_2 + \delta_p - \ln R_1$$

$$\epsilon_{pc} = -\ln R_2 + \delta_{pc} - \ln R_{pc}$$

此处  $\delta_p$  和  $\delta_{pc}$  分别为这两种腔内光学元件的吸收、散射、衍射损耗之和。一般相位共轭腔中的光学元件都比较少,且总是稳定腔<sup>[4]</sup>,所以显然有  $\delta_{pc} < \delta_p$ 。

更深入地来看,由于共轭镜  $M_{pc}$  的反射率有一个从小变大的过程,因此从起始腔向完全相位共轭腔转变时,要经历一个短暂的非完全相位共轭腔阶段,这种过渡性的非完全共轭腔的腔损耗应为

$$\epsilon_{tr} = -\ln R_2 + \delta_{pc} - \ln R_1' - \ln R_{pc}'$$

这里  $R_{pc}'$  代表随腔内光强增大的相位共轭镜的反射率; $R_1'$  代表从平面镜  $M_1$  反射回来,又透过共轭镜  $M_{pc}$  而进入相位共轭腔的反射光的比率,其中已包括了  $M_{pc}$  与  $M_1$  之间的光学元件的吸收、散射、衍射等损耗。在共轭镜  $M_{pc}$  形成之前, $R_{pc}' = 0$ , $\epsilon_{tr}$  即为  $\epsilon_p$ ;随着  $R_{pc}'$  的增大, $R_1'$  迅速变小,当  $R_{pc}'$  增大到  $R_{pc}$  时, $R_1'$  已小到可忽略,此时  $\epsilon_{tr} \rightarrow \epsilon_{pc}$ 。这正反映了

共轭镜  $M_{pc}$  对平面反射镜  $M_1$  的替代过程。

### 3 自调 Q 过程的速率方程理论

从速率方程理论以及谐振腔内损耗的突变情况出发,能得到 SBS 相位共轭腔自调 Q 脉冲的脉宽估算公式。

对于氙灯抽运的 Nd:YAG, Cr:LiSAF 等四能级激光系统来说,速率方程可简化为<sup>[5]</sup>

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \phi \left( \cos n \frac{l}{l'} - \frac{\epsilon}{t_R} \right) \\ \frac{\partial n}{\partial t} = -\gamma n \phi \sigma c \end{cases} \quad (1)$$

这里  $n$  为反转粒子数密度, $\phi$  为腔内光子流通量, $\epsilon$  为腔的总损耗(对相位共轭腔则有  $\epsilon = \epsilon_{pc}$ ), $\sigma$  为受激发射截面, $c$  为真空中的光速, $l$  为激光棒的长度, $l'$  为激光腔的光程长度(对相位共轭腔则有  $l' = L_{pc}$ ), $t_R = 2l'/c$  为光子在腔内往返一周的时间, $\gamma = 1 + (g_2/g_1)$ , $g_2, g_1$  为激光上下能级的简并度。

由于池中 SBS 过程一旦启动,相位共轭镜反射率将以指数规律被迅速地谐振放大,它是典型的非线性增强过程,一般在几十纳秒时间内就能达到其饱和反射率,也就是说从起始腔转变到共轭腔的整个过程仅有几十纳秒的时间。而通常的氙灯抽运以及激光上能级粒子数的积累过程都要持续几十至上百微秒的时间。因此,相对而言,从起始腔到共轭腔的转变过程所引起的腔损耗突变或 Q 值突变,是一种快的 Q 开关过程。

因此,可以用文献[5]的方法处理速率方程组(1),求解出相位共轭腔自调 Q 脉冲的脉宽(FWHM)公式

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

且

$$n_i - n_f = -n_{th} \ln(n_f/n_i) \quad (3)$$

为了便于理解,将(3)式代入(2)式可进一步得

$$\Delta t_{FWHM} = \tau_{pc} \frac{-\ln(n_f/n_i)}{n_i/n_{th} - [1 + \ln(n_i/n_{th})]} \quad (4)$$

再将(3)式写成

$$n_i/n_{th} = \frac{\ln(n_f/n_i)}{n_f/n_i - 1} \quad (5)$$

其中  $\tau_{pc} = 2L_{pc}/(\alpha_{pc})$  为相位共轭腔内光子寿命,它与相位共轭腔的光程长度及腔内的总损耗大小有关, $n_{th} = \epsilon_{pc}/(2\sigma l)$  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能级反转粒子数密度。

由(3)式或(5)式可画出  $n_f/n_i$  与  $n_i/n_{th}$  之间的相互关系曲线<sup>[6]</sup>,如图 2 所示。它直观地表明当腔损耗一定时,随着氙灯抽运能量的增大,或者当氙灯抽运能量一定时,随着腔损耗的降低,都会引起  $n_i/n_{th}$  的增大,使得在调 Q 脉冲形成之后,激光介质棒中未抽尽的残留能量或反转粒子数迅速减少(即  $n_f/n_i$  迅速变小),因而获得更高峰值功率、更窄脉宽的调 Q 脉冲输出。

将(5)式与(4)式结合起来便可对 SBS 相位共轭腔自调 Q 脉冲的脉宽进行估算。

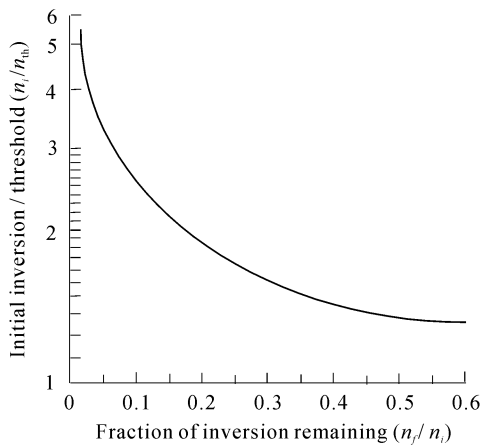


图 2  $n_f/n_i$  与  $n_i/n_{th}$  之间的相互关系曲线

Fig. 2 Relationship between  $n_f/n_i$  and  $n_i/n_{th}$

#### 4 自调 Q 脉宽的公式估算值与实验值的比较

在我们的宽线宽 Cr:LiSAF 固体激光 SBS 相位共轭谐振腔实验中,腔型如图 1 所示。其输出耦合镜  $M_2$  的反射率  $R_2 = 90\%$ ,  $M_{pc}$  的饱和反射率只能达到  $R_{pc} = 80\% \sim 90\%$ (很理想的情况下才可达 100%),共轭腔内光学元件的吸收、散射、衍射损耗之和  $\delta_{pc} < 5\%$ (同等尺寸的普通平平腔的这些损耗一般都不低于 10%),所以  $\epsilon_{pc} = -\ln R_2 + \delta_{pc} - \ln R_{pc} \approx 0.3$ ;一般相位共轭腔光程长度  $L_{pc} = 60$  cm 左右。通过计算可得相位共轭腔内光子寿命  $\tau_{pc} \approx 13.3$  ns。因此可得表 1 所列出的数值(表中  $\Delta t_{FWHM}$  的单位为 ns)。

表 1  $n_i/n_{th}$ ,  $n_f/n_i$  和  $\Delta t_{FWHM}$  三者之间的关系

Table 1 Relationship between  $n_i/n_{th}$ ,  $n_f/n_i$  and  $\Delta t_{FWHM}$

$n_i/n_{th}$	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
$n_f/n_i$	0.2	0.108	0.06	0.031	0.02	0.011
$\Delta t_{FWHM}$	53.2	49.2	41.2	37.0	32.0	30.0

如图 2 曲线所示,当  $n_i/n_{th} > 4.0$  时,为高粒子数反转情况;而当  $n_i/n_{th} < 3.0$  时则为低粒子数反转情况<sup>[6]</sup>。对于 SBS 相位共轭激光谐振腔,由于需要起始腔中的静态激光启动,所以在从起始腔向共轭腔转变时,必定要消耗一部分反转粒子数,使自调 Q 过程在高粒子数反转情况下难以进行。在图 1 所示的 Cr:LiSAF 宽线宽 SBS 共轭腔实验中,由于其启动阈值特别高,启动过程所消耗的反转粒子数也特别多,因此在氙灯抽运能量不是非常高的时候,自调 Q 过程一般只能在低粒子数反转条件下进行,即自调 Q 脉冲的脉宽(FWHM)将为 50 ns 左右,此估算值与我们得到的实验值基本相符。若要得到 35 ns 左右的自调 Q 窄脉冲,则必须设法降低 SBS 相位共轭腔的启动阈值,或增大氙灯的抽运能量(此增大范围有限),使自调 Q 过程在高粒子数反转条件下进行,对此我们也做了初步的实验验证。

#### 5 结 论

本文分析了从起始腔向 SBS 相位共轭腔转变时,腔损耗突变的整个过程,并根据 SBS 的瞬间性特点得知腔损耗突变仅发生在几十纳秒时间内,其为快的 Q 开关过程。将四能级激光系统的速率方程理论和快 Q 开关特性结合起来,给出了 SBS 相位共轭腔的自调 Q 脉冲的脉宽估算公式。在宽线宽 Cr:LiSAF 固体激光 SBS 相位共轭腔中,验证了该公式的正确性,证明其在估算各类 SBS 相位共轭腔自调 Q 脉冲的脉宽时,具有一定的应用价值。

#### 参 考 文 献

- 1 D. Pohl. A new laser Q-switch-technique using stimulated Brillouin scattering [J]. *Phys. Lett. A*, 1967, **24**(4):239~240
- 2 V. I. Bezrodnyi, F. I. Ibragimov, V. I. Kislenko *et al.*. Mechanism of laser Q switching by intracavity stimulated scattering [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1980, **10**(3):382~383
- 3 Chen Jun, Long Yin, Zhou Yueming. Investigation on the Q-switch mechanism in the phase conjugate resonator with the SBS-cell [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1993, **A20**(6):421~425 (in Chinese)
- 4 N. N. Ilchev, A. A. Malyutin, P. P. Pashinin. Laser with diffraction-limited divergence and Q switching by stimulated Brillouin scattering [J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1982, **12**(9):1161~1164
- 5 W. Koehler. Solid-State Laser Engineering [M]. New York: Springer-Verlag New York Heiderberg Berlin, 1976. 75~80, 397~402
- 6 W. G. Wagner, B. A. Lengyel. Evolution of the giant pulse in a laser [J]. *J. Appl. Phys.*, 1963, **34**(7):2040~2046