

# 带 SBS 池的位相共轭激光器调 $Q$ 机理的研究\*

陈 军 龙 鹰 周 月 明

(浙江大学光科系现代光学国家重点实验室, 杭州 310027)

**提要** 本文从速率方程出发,分析了带 SBS 池的 Nd:YAG 位相共轭激光器的调  $Q$  机理,给出了调  $Q$  的理论模型。用数值计算方法求出了输出调  $Q$  脉冲的腔内光子数密度与时间的关系曲线,与实验值基本相符。

**关键词** 位相共轭激光器,受激布里渊散射, $Q$  开关

## Investigation on the $Q$ -switch mechanism in the phase conjugate resonator with the SBS-cell

CHEN Jun, RONG Yin, ZHOU Yueming

(Dept. of Optical and Scientific Instrumentation Engineering,  
Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract** Based on the rate equation we have analysed the  $Q$ -switch mechanism in the Nd:YAG phase conjugating laser with the SBS cell and established a theoretical model for the  $Q$ -switch process. With the numerical calculation we have got the relationship of photon density versus time. It is in good agreement with the experimental values.

**Key words** phase conjugate resonator, SBS,  $Q$ -switch

## 1 引 言

受激布里渊散射(SBS)由于其后向散射光相对入射光存在着相位复共轭关系,以及具有较小的频移量和自调  $Q$  等特点,故可使之作为位相共轭镜而应用于激光谐振腔,以此获得具有较好空间模式的调  $Q$  激光脉冲。我们曾报道了用高压 SF<sub>6</sub> 气体作为 SBS 介质与 Nd:YAG 构成位相共轭谐振腔(PCR),获得了能量在 100 mJ 以上的激光脉冲输出,其脉宽在 10~30 ns 之间<sup>[1]</sup>。本文着重从速率方程以及带 SBS 池激光腔的损耗出发,用数值计算方法求得了 PCR 腔内光子数随时间( $t$ )的变化曲线,得到了调  $Q$  脉冲的脉宽理论值约为 20 ns 左右。

## 2 实验装置

SBS-PCR 的实验装置如图 1 所示。其中  $M_1$  及  $M_2$  为平面反射镜,其反射率分别为 30% 和 100%, $T$  为衰减片。SBS 池是由高压(2.2 MPa)气体及池内的望远镜系统组成。由  $M_1M_2$  组成的

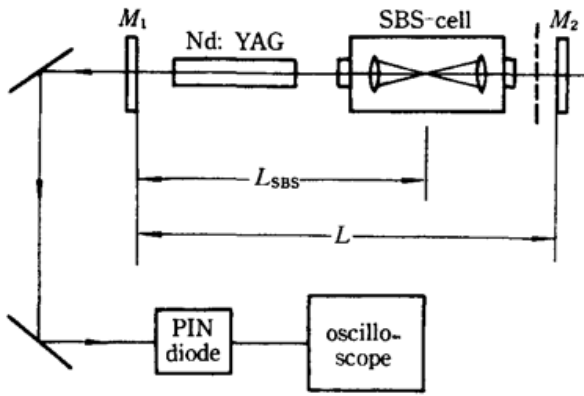
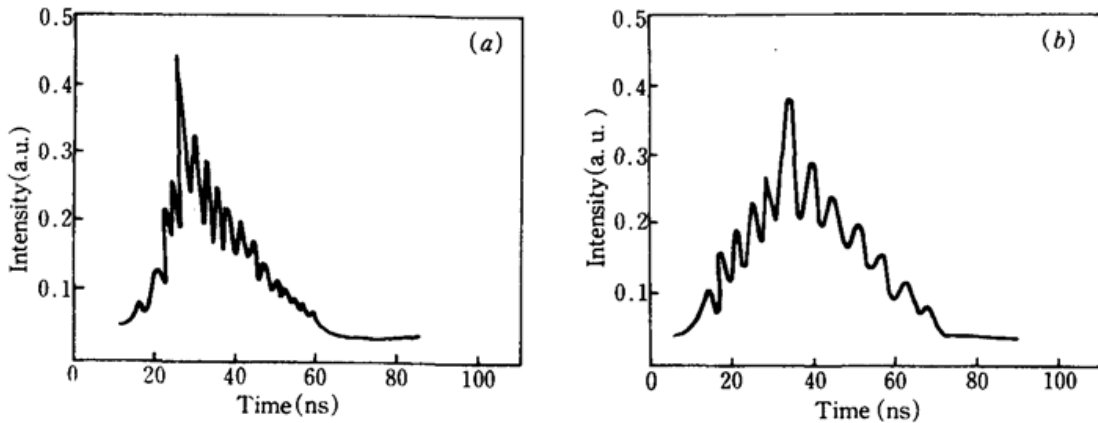


Fig. 1 Experimental arrangement

谐振腔形成的自由振荡激光模作为起始泵浦光在SBS池中形成密度光栅产生后向散射,形成具有反射率随入射光强变化的相位共轭镜。在这个过程中初期,由于腔内的衍射、衰减片 $T$ 、SBS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SBS阈值时,由于反射率的突增、腔长的减小以及对位相畸变的抵消造成腔内 $Q$ 值突增。SBS盒在这时既起了腔镜的作用,又起了 $Q$ 开关的作用。实验测得:当 $L = 189$  cm,  $L_{SBS} = 126$  cm时,输出激光的脉冲宽度为20~25 ns,输出脉冲能量为110 mJ;当 $L = 120$  cm,  $L_{SBS} =$

63 cm时,输出激光脉冲宽度为10~15 ns,输出脉冲能量为175 mJ。图2示出了以上二种情况下测得的脉冲形状。

Fig. 2 Temporal profile of the  $Q$ -switched pulse from the SBS-PCR with the resonator length

(a)  $L_{SBS} = 126$  cm,  $L - L_{SBS} = 63$  cm,  $T = 52.7\%$ ; (b)  $L_{SBS} = 63$  cm,  $L - L_{SBS} = 57$  cm

### 3 SBS位相共轭腔的调 $Q$ 理论模型

Nd:YAG是四能级系统。由于从 ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ 的弛豫时间(约30 ns)比调 $Q$ 脉冲宽度大,所以在处理调 $Q$ 问题时可将其当作三能级系统。同时,由于 $Q$ 开关脉冲时间持续很短,可忽略自发辐射和光泵浦,得到速率方程<sup>[2]</sup>:

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

这里 $n$ 为反转粒子数密度, $\phi$ 为腔内光子数密度, $l$ 为激活介质长度, $l'$ 为激光腔长, $t_R$ 为光子在腔内往返一周的时间, $t_R = (2l'/c)$ , $\gamma = 1 + (g_2/g_1)$ , $g_2, g_1$ 表示激光上下能级简并度, $\epsilon$ 为腔内损耗,它可以表示为

$$\epsilon = -\ln R_1 + 2\alpha l - \ln R_2^* \quad (2)$$

$R_1$ 为镜 $M_1$ 的反射率, $R_2^*$ 在SBS启动前表示镜 $M_2$ 的反射率,在SBS启动后代表SBS的反射率。 $\alpha$ 为腔内除了 $R_1, R_2$ 耦合损耗外其它所有随机损耗,如衍射损耗、衰减片、吸收及散射等。

为简化计算,将  $\alpha$  分为二部分:  $\alpha_1$  属于  $R_1$  到 SBS 池焦点前的损耗,把它归并于  $R_1$  成为  $R_1'$ ;  $\alpha_2$  属于 SBS 焦点之后到  $R_2$  间的损耗,它只在 SBS 启动前起作用,将其归入  $R_2'$  中,这样就可将 (2) 式写为

$$\varepsilon = -\ln R_1' - \ln R_2' \quad (3)$$

在 Q 开关形成过程中  $R_2'$  是随时间变化的,在振荡开始时,  $R_2'$  就是后反镜的反射率  $R_2$  及损耗  $\alpha_2$ , 此时  $R_2'$  为一常数。当光强达到 SBS 阈值之后, SBS 池的反射率随入射光强而变,实验测得其关系如图 3 (a) 所示<sup>[3]</sup>。在计算过程中,对  $R_2'$  作了线性化简化处理,即  $R_2'$  表示为

$$R_2' = \begin{cases} R_2 e^{-2\alpha_2 t} & 0 < t < t_1 \\ A\Phi & t_1 < t < t_p \\ R_{\text{SBS}} & t > t_p \end{cases} \quad (4)$$

如图 3 (b) 所示。这里  $t_1$  为腔内光强达到 SBS 阈值的时间,  $t_p$  为  $R_{\text{SBS}}$  达到饱和值的时间。同样,腔长也要从  $t_1$  时刻起发生变化,即

$$l' = \begin{cases} L & 0 < t < t_1 \\ L_{\text{SBS}} & t_1 < t < t_p \end{cases} \quad (5)$$

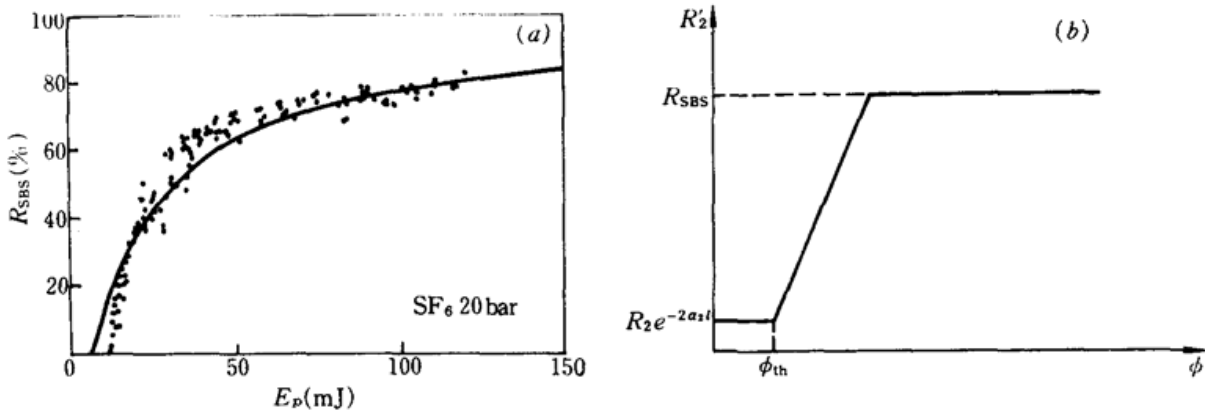


Fig. 3 Reflectivity of SBS cell

(a) The measured reflectivity of SBS cell; (b) The reflectivity of SBS cell by simplifying numerical calculation

而谐振腔的 Q 值为储存在谐振器内的能量与单位角频率  $\omega_0$  内谐振器的消耗功率之比,以此定义的 Q 值为

$$Q = 2\pi \left[ 1 - \exp\left(\frac{-T_0}{\tau_c}\right) \right]^{-1} \approx \frac{2\pi\tau_c}{T_0} = 2\pi\nu_0\tau_c \quad (6)$$

这里  $\tau_c$  为无源谐振腔内辐射的衰减时间常数,亦即腔内光子寿命。它与功率损耗  $\varepsilon$  有关:

$$\varepsilon = t_R/\tau_c \quad (7)$$

结合(3)、(4)式,可求得带 SBS 池的共轭腔 Q 值为

$$Q = \begin{cases} 4\pi\nu_0 L [-\ln R_1' - \ln(R_2 e^{-2\alpha_2 t})]^{-1}/c & 0 < t < t_1 \\ 4\pi\nu_0 L [-\ln R_1' - \ln(A\Phi)]^{-1}/c & t_1 < t < t_p \\ 4\pi\nu_0 L [-\ln R_1' - \ln R_{\text{SBS}}]^{-1}/c & t > t_p \end{cases} \quad (8)$$

按此式画出的曲线如图 4 所示。谐振腔的 Q 值在 SBS 启动后将有一突变而形成调 Q 脉冲。

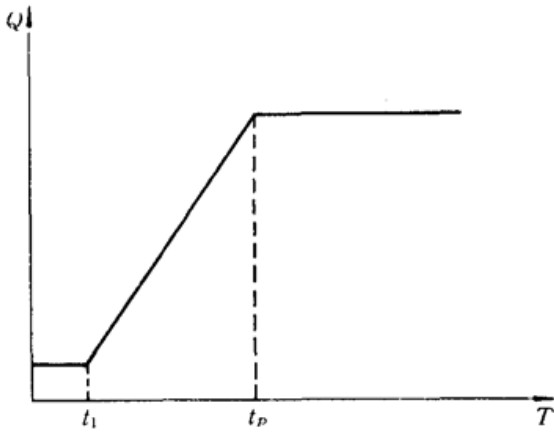


Fig. 4 The quality factor  $Q$  of the SBS-PCR

1) 初始值  $n_0^*$  及  $\phi_0^*$

据速率方程,可由  $(\partial \phi_0^* / \partial t) = 0$  求得阈值反转粒子数  $n_t^* = \epsilon / 2\sigma Nl$ , 而初始反转粒子数  $n_0^*$  一般可超过阈值反转粒子数 5% 左右,取  $n_0^* = 1.05\epsilon / 2\sigma Nl$ .

$\phi^*$  的初始值  $\phi_0^*$  对输出脉冲的脉宽及能量影响不大,它只对脉冲建立的延迟时间有影响,我们选取了  $\phi_0^*$  在  $10^{-10} \sim 10^{-11}$  之间,这里未考虑多脉冲现象。

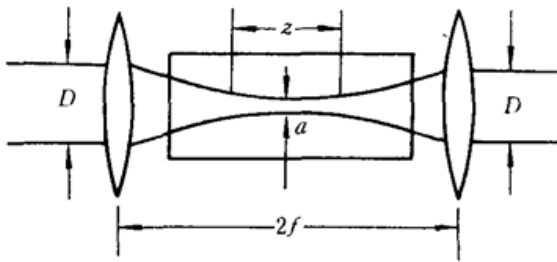


Fig. 5 Laser beam in the SBS cell with a telescope system

pump bands

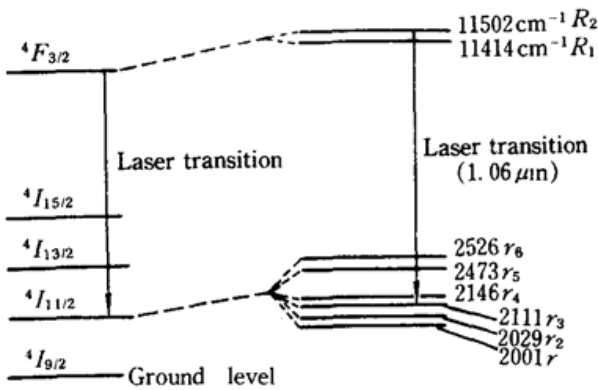


Fig. 6 Energy level diagram of Nd : YAG

### 4 速率方程求解

我们应用龙格—库塔法编写了计算程序求解速率方程。计算前,先将速率方程作归一化处理,令  $n^* = n/N, \phi^* = \phi/N, N$  为 YAG 棒中掺  $Nd^{3+}$  离子的浓度,一般取  $N = 1.38 \times 10^{-20} \text{cm}^{-3}$ [2]。由此得到归一化的速率方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial n^*}{\partial t} = -\gamma n^* \phi^* \sigma c N \\ \frac{\partial \phi^*}{\partial t} = \phi^* \left( N c \sigma n^* \frac{l}{l'} - \frac{\epsilon}{t_R} \right) \end{cases} \quad (9)$$

为解(9)式,必须先确定以下参数:

2) 反射率中的系数  $A'$

当光强超过阈值后, SBS 池的反射率为  $R_2' = A' \phi_0^*$ 。在图 1 所示的反馈系统中,为得到足够的后向散射,初始斯托克斯场需放大约  $\exp(g l' z) = \exp(10)$ , 这里  $l'$  是入射光经望远镜系统会聚后的瑞利范围  $z$  中的平均光强(图 5), 经计算可得  $A' = 9.7 \times 10^4$ 。

3)  $\gamma$  值

按(1)式,  $\gamma = 1 + g_2/g_1$ 。按 Nd : YAG 能级图(图 6)二激光跃迁能级的反转粒子数为  $n = n_{R_2} - (g_{R_2}/g_{R_3})n_{R_3}$ , 而  $g_{R_2} = g_{R_3} = 1$ , 由于  $R_1, R_2$  能级间隔很小,故可把  $R_1, R_2$  类似看作简并能级,据玻尔兹曼定律得  $g_2 = (n_2/n_{R_2})g_{R_2} = 2.5, g_1 = 5$ , 所以  $\gamma = 1 + (g_2/g_1) = 1.5$ 。

$\sigma$  值一般在  $2.7 \sim 8 \times 10^{-19} \text{cm}^{-2}$  之间,利用数值解法,便可解出  $\phi(t)$ , 图 7 示出了在不同  $R_2$ (几种极限情况下)调 Q 脉冲  $\phi(t)$  曲线的计算结果。其中  $R_2 = 0.077$  及  $0.28$  二曲线相应于实验中插入衰减片  $T = 2 \times 52.7\%$  及  $52.7\%$  的情况。计算结果( $l_{\text{SBS}} = 120 \text{cm}$ )与实验结果(图 2(a))基本相符。当取  $l_{\text{SBS}} = 60 \text{cm}$  时,计算脉宽减少约一半,

亦与实验结果基本符合。

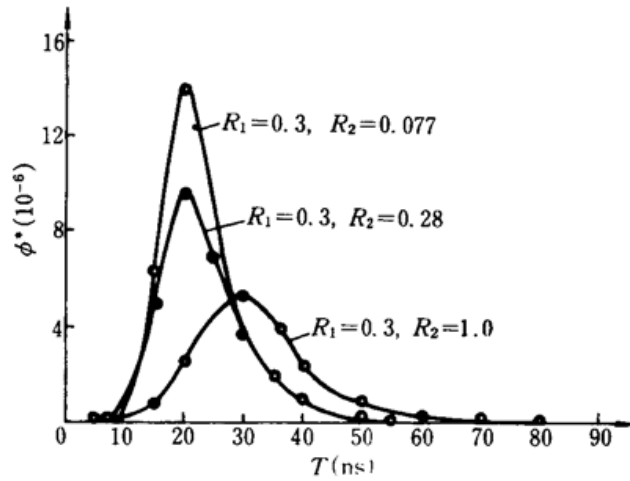


Fig. 7 Numerically calculated  $\phi(t)$   $T$  curve with the different reflectivity  $R_2$

在实验中还观察到其它现象,如在泵浦能量过高或  $R_2$  反射率过高时出现多脉冲现象,这可能与初始粒子数反转  $\phi_0^*$  有关,又如在每个脉冲中出现几个小峰现象,这可能与腔长匹配及部分锁模有关。

### 参 考 文 献

- 1 陈 军,龙 鹰,马跃如, Proceedings of SPIE, Volume 1726, 504~509, 1992
- 2 W. Koechner, Spring Series in Optical Sciences, 1, 402~405, 2nd Edition (1988)
- 3 A. Kummrous, H. T. Eichler *et al.*, SBS-Phase Conjugators, Proc. ISLA 90', Vilnius, Aug. 19~23, 1990