

# SBS 后向放大改善固体激光器发散性的研究\*

于欣 鞠有伦 王月珠 王骥 陈德应

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

**摘要** 在理论上分析了 SBS 相位共轭效应和阈值效应都可以导致后向 SBS 的光束发散角减小。在实验上, 将受激布里渊散射相位共轭镜(SBS PCM)用于 Nd:YAG 激光器上补偿了波前畸变, 改善了光束质量, 压缩了发散角。研究了抽运能量、透镜焦距、SBS 介质等因素对 SBS 后向放大光的光束质量的影响, 利用 SBS PCM 代替普通全反镜的后向放大光的光束质量得到明显改善。

**关键词** 受激布里渊散射(SBS), 相位共轭, 发散角

中图分类号 O437.2; TN248.1 文献标识码 A

## Investigation for Improving the Solid State Laser Divergence with the Amplifying Back-SBS

YU Xin JU You-lun WANG Yue-zhu WANG Qi CHEN De-ying

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

**Abstract** In the paper, the phase conjugation effect and the threshold effect of SBS inducing the reducing of the divergence angles of back-SBS were discussed in the theory. In the experiment, the wave-front aberration was compensated, the beam quality was improved, and the divergence angles were compressed by using the SBS PCM in the Nd:YAG laser. The pumping energy, lens focal length and SBS medium affecting the beam quality of the amplifying back-SBS were studied, the beam quality was improved in evidence by using SBS system to replace the general holophote.

**Key words** stimulated Brillouin scattering (SBS), phase conjugation, divergence angles

## 1 引言

近些年来, 由于受激布里渊散射(SBS)具有后向散射、相位共轭、脉冲压缩等特性引起了广泛的注意。利用 SBS 相位共轭效应改善光束质量已成为一种有效的技术手段, 被应用于激光核聚变、成像畸变修正、激光束并束以及脉冲波形整形等领域。带有 SBS 相位共轭镜的激光系统可以输出  $M^2$  值近似于 1, 光束发散角接近于衍射极限, 光强空间分布均匀的光束<sup>[1,2]</sup>。

本文在理论上, 从 SBS 相位共轭理论和阈值效应出发推导慢变化振幅近似下的耦合波方程, 得到了发散角变化规律的关系式。在实验上, 用受激布

里渊散射相位共轭镜(SBS PCM)代替普通反射镜用于 Nd:YAG 偏振抽取腔补偿了激活介质和光学元件造成的波前畸变, 压缩了发散角, 光束质量得到明显改善。

## 2 基本理论

当抽运光脉宽远大于 SBS 介质的声子寿命时, 认为 SBS 是稳态过程, 从抽运光和受激散射光的慢变化振幅耦合波方程组中可导出抽运光束半径  $\alpha_0$  与受激散射光束半径之比  $D$  为<sup>[3]</sup>:

$$D = [1 + (GI_0\alpha_0/\theta_0)]^{1/2} \quad (1)$$

式中  $G$  为增益因子,  $I_0$  为抽运光强,  $\theta_0$  为聚焦抽运光的光束发散角。当增益  $G > 0$  时, 发散角压缩比  $D > 1$ , 即受激散射光束的发散角比抽运光束的发散角小, 并且, 随抽运光强增加, 受激散射光束的发散

\* 国家自然科学基金(69988002)和哈尔滨工业大学校基金(HIT2000.35)资助课题。

角减小,即发散角压缩比  $D$  增大。若考虑到受激散射阈值效应对受激散射光束发散角的影响,可引进受激散射阈值强度,忽略受激散射光对抽运光的影响,在单模近似下,可以获得激活区半径为:

$$\gamma_{\perp}(z, I_{th}) = [-w^2 \ln(w^2 I_{th}/I_0)]^{1/2} \quad (2)$$

$$w^2 = w_0^2 [1 + (z/z_0)^2]$$

式中  $w_0$  为光束束腰半径,  $z_0$  为聚焦参量,  $I_{th}$  为受激散射阈值强度。对于转动抽运场,抽运光和受激散射光的慢变化振幅  $E_p, E_s$  可以按高斯-拉盖尔函数系展开<sup>[4]</sup>,  $E_s^*$  的零阶展开系数为:

$$S_0^*(z) = S_0 \exp\left(\int_{z_{in}}^z d \cdot V_{00} dz\right) \left\{ \begin{array}{l} \exp\left[\int_{z_1}^z \frac{1}{2} g_s |P_0|^2 Q_{00}\right] dz, r(z) \leq r_{\perp}(z, I_{th}) \\ \exp\left[\int_{z_1}^{z_2} \frac{1}{2} g_s |P_0|^2 Q_{00}\right] dz, r(z) > r_{\perp}(z, I_{th}) \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$d = (k_p + k_s)/k_s, \quad g_s = 2G_0, \quad V_{00} = \int_0^{r_{\perp}(z, I_{th})} \frac{\partial U_0^*}{\partial z} U_0 dr, \quad Q_{00} = \int_0^{r_{\perp}(z, I_{th})} |U_0|^4 dr$$

式中  $k_p, k_s$  分别为抽运光和受激散射光的波数,  $E_p$  的零阶展开系数  $P_0$  近似为常数,  $U_0$  为零阶高斯-拉盖尔函数,  $z_1, z_2$  可以通过方程(2) 来确定,受激散射光的光强分布为:

$$I_s = |S_0^*|^2 \times |U_0|^2 \quad (4)$$

根据方程(2) ~ (4),随横向半径  $r_{\perp}(z)$  的增加,受激散射光强比抽运光强减小更快,从而导致受激散射光束半径比抽运光束半径小,即受激散射光束发散角比抽运光束发散角小。可是,随抽运光强增加,激活区半径增大,导致受激散射光束发散角随抽运光的增强而增大。

从上述分析可知,当相位共轭效应对受激散射光束发散角的影响起主要作用时,由于随抽运光强的增大,激活区面积缩小,受激散射光束发散角随抽运光的增强而减小,即发散角压缩比随抽运光的增强而增大;反之,当受激散射阈值效应对受激散射光束发散角的影响起主要作用时,由于随抽运光强的增加,激活区半径增大,受激散射光束发散角随抽运光的增加而增大,即发散角压缩比随抽运光增强而减小。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 实验装置

实验光路如图1所示。由全反镜  $M_1$  和部分反射镜  $M_2$  (反射率 8%) 构成 Nd:YAG 振荡级的谐振腔, Q 开关选用  $Cr^{4+}$ :YAG(透过率为 30%), SBS 后向放大光从偏振片耦合输出。采用美国 Spiricon 公司生产的光束质量分析仪(Model M<sup>2</sup>-101)分别测量了抽运能量、透镜焦距、SBS 介质对 SBS 后向放大输出光光束质量的影响,及利用普通全反镜代替 SBS 系统的后向放大光的  $M^2$  值和发散角。

#### 3.2 抽运能量对 SBS 后向放大光光束质量的影响

采用  $CS_2$  作为 SBS 介质,透镜焦距为 100 mm,测得不同抽运能量下的 SBS 后向放大输出光的  $M^2$  值和发散角(表 1)。

由表 1 看出,随着抽运光能量增高, SBS 后向放大输出光发散角增大,相应的  $M^2$  值增大,光束质量变差。这是由于在抽运能量略高于 SBS 阈值时, SBS 阈值效应对受激散射光束发散角的影响起主要作用,因此 SBS 光束发散角随抽运光能量的增加而增大。

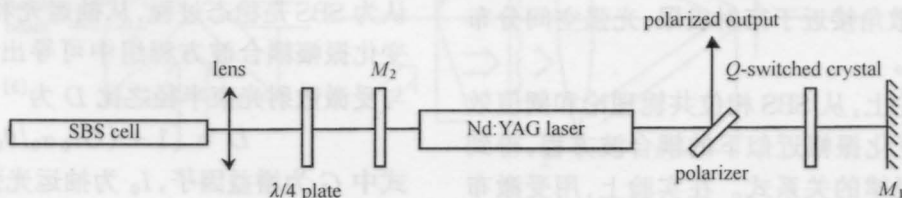


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

表1 不同抽运能量下SBS后向放大光的光束参数表( $\theta_0$ 单位: mrad)

Table 1. Back-SBS beam parameters with different pumping energy ( $\theta_0$  unit: mrad)

Beam energy		24.75 mJ	26.19 mJ	30.06 mJ	48.37 mJ	52.06 mJ
$\theta_0$	x direction	1.392	1.395	1.614	1.893	2.015
	y direction	1.680	1.692	1.984	2.342	2.610
$M^2$	x direction	1.58	1.60	2.10	2.36	2.59
	y direction	1.68	1.74	2.40	3.07	3.54

表2 不同透镜焦距下SBS后向放大光的光束参数表( $\theta_0$ 单位: mrad)

Table 2. Back-SBS beam parameters with different lens focal lengths( $\theta_0$  unit: mrad)

Focal energy		50 mm	100 mm	200 mm	250 mm	300 mm
$\theta_0$	x direction	1.429	1.395	1.345	1.267	1.258
	y direction	1.698	1.692	1.522	1.356	1.349
$M^2$	x direction	1.63	1.60	1.43	1.37	1.36
	y direction	1.77	1.74	1.40	1.35	1.32

3.3 透镜焦距对SBS后向放大光光束质量的影响

为研究透镜焦距对SBS后向放大输出光光束质量的影响,保持抽运光能量一定(26.19 mJ),以CS<sub>2</sub>作为SBS介质,使用焦距分别为50 mm,100 mm,200 mm,250 mm,300 mm的聚焦透镜,测得SBS后向放大输出光光束质量(表2)。

由表2看出,随着透镜焦距的增大,SBS后向放大输出光的发散角 $\theta_0$ 变小,相应的 $M^2$ 值变小,即光束质量得以改善。透镜焦距越长,使得散射池中的聚焦深度越大,有效相互作用长度越大,SBS反射率和相位共轭保真度均会提高。因此,要想得到好的光束质量,必须选择合适的透镜(焦距较长)。

3.4 不同介质对SBS后向放大输出光光束质量的影响

在抽运能量(26.19 mJ)和透镜焦距(100 mm)

一定的情况下,采用CCl<sub>4</sub>,丙酮和CS<sub>2</sub>介质,声子寿命分别为0.6 ns,2.67 ns和6.4 ns,获得的SBS后向放大输出光的光束质量如表3所示。

表3 不同介质下SBS后向放大光的光束参数( $\theta_0$ 单位: mrad)

Table 3. Back-SBS beam parameters with different mediums( $\theta_0$  unit: mrad)

SBS mediums		CCl <sub>4</sub>	丙酮	CS <sub>2</sub>
$\theta_0$	x direction	1.167	1.323	1.395
	y direction	1.311	1.452	1.692
$M^2$	x direction	1.33	1.51	1.60
	y direction	1.30	1.51	1.74

由于SBS反射率和相位保真度随介质声子寿命增大而减小,因此采用声子寿命短的CCl<sub>4</sub>得到的

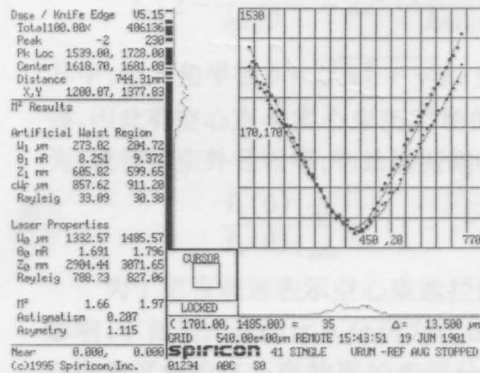
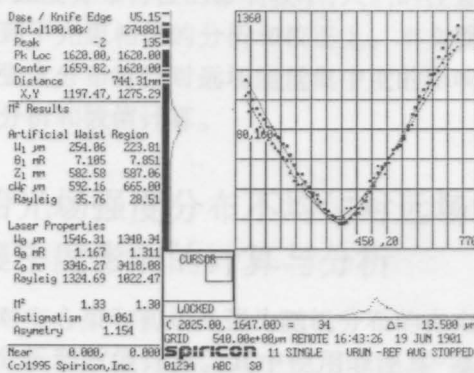


图2 带SBS PCM(a)和带普通反射镜(b)的后向放大光的光束质量

Fig. 2 Back amplified beam quality with SBS PCM (a)and with normal full-reflector mirror (b)

输出光发散角  $\theta_0$  和  $M^2$  值都是较小的,而用  $CS_2$  得到的输出光发散角  $\theta_0$  和  $M^2$  值是较大的。

### 3.5 带 SBS PCM 和带普通反射镜的后向放大光束质量

在抽运能量为 26.19 mJ,透镜焦距为 100 mm 时,采用  $CCl_4$  作为 SBS 介质进行了带 SBS PCM 和带普通反射镜的后向放大光光束质量的比较,如图 2 所示,进一步证实了 SBS 具有改善光束质量的优越性。

## 4 结 论

通过以上分析和实验研究,认为利用 SBS PCM 可以明显地改善激光器的光束质量。对 SBS 而言应考虑合适的抽运能量、较长的透镜焦距、较短的介质声子寿命等因素。我们在进行优化设计的基础上

采用以上结构的 YAG 激光系统进行了室外 1 km 大气传输的实验研究,获得了较理想的结果。

### 参 考 文 献

- 1 A. Dehn, H. J. Eichler, A. Haase *et al.*. Phase conjugation for improvement of solid state and excimer laser. *Proc. SPIE*, 1998, **3403**:65~76
- 2 H. J. Eichler, A. Haase, M. R. Kokta *et al.*.  $Cr^{4+}$ : YAG as passive Q-Switch for a Nd: YALO oscillator with an average repetition rate of 2.7 Hz, TEM<sub>00</sub> mode and 13 W output. *Appl. Phys. (B)*, 1994, **58**:409~411
- 3 N. B. Baranova, B. Ya. Zeldovich. Wavefront reversal of focused beams (theory of SBS). *Sov. J. Quant. Electron.*, 1980, **10**(5):555~560
- 4 A. Gavrielides, P. Peterson. Diffractive Raman scattering in focused geometry. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(10):1394~1407