

文章编号 : 0253-2239(2002)10-1255-04

# 利用受激布里渊散射改善偏振抽取腔 光束质量的研究\*

王 骥 于 欣 王月珠 鞠有伦 陈德应 贾永伟

(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: 在理论上分析了受激布里渊散射相位共轭效应和阈值效应对后向受激布里渊散射光束发散角的影响。在实验上, 用受激布里渊散射相位共轭镜(SBS PCM)代替普通反射镜构成 Nd:YAG 激光器的偏振抽取腔, 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, 改善了光束质量。研究了抽运能量、透镜焦距等因素对受激布里渊散射偏振抽取腔输出光光束质量的影响。

关键词: 受激布里渊散射; 相位共轭; 发散角;  $M^2$  值

中图分类号: O437.2 文献标识码: A

## 1 引 言

近些年来, 非线性光学相位共轭技术在自适应光学、高能量高亮度激光系统以及光学信息处理、图像传输、运动检测、滤波和超低噪声通信等领域展现出广泛的应用潜力。受激布里渊散射具有结构简单、自抽运, 可以实现高的相位共轭转换效率和高的相位共轭保真度。利用受激布里渊散射(SBS)相位共轭技术是激光系统获得高光束质量的重要手段, 正在被研究用于发展高功率激光系统尤其是聚变装置, 以及激光系统级间去耦、激光脉冲压缩、放大级畸变修正、激光束并束等许多方面<sup>[1~3]</sup>。

本文利用受激布里渊散射相位共轭理论和阈值效应推导慢变化振幅近似下的耦合波方程, 讨论了发散角变化规律。在 Nd:YAG 偏振抽取腔中采用受激布里渊散射相位共轭镜代替普通反射镜, 补偿了激活介质和光学元件造成的波前畸变, 输出光的发散角得到压缩, 改善了光束质量。同时研究了抽运能量、透镜焦距等因素对受激布里渊散射偏振抽取腔输出光光束质量的影响。

## 2 理论分析

受激布里渊散射过程可以用三个基本方程描

述: 连续性方程、纳维-斯托克斯方程、能量输运方程。受激布里渊散射散射光的各种特性可以通过求解以上三个方程得到。

当抽运激光脉冲宽度远大于受激布里渊散射介质的声子寿命时, 作稳态处理。从抽运光和受激散射光的慢变化振幅耦合波方程组中导出的抽运光束半径  $a_0$  与受激散射光束半径之比  $D$  为<sup>[4]</sup>

$$D = \left( 1 + \frac{GI_0 a_0}{\theta_0} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

式中  $G$  为斯托克斯光的指数增益,  $I_0$  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。

通过引进受激散射阈值强度, 讨论受激散射阈值效应对受激散射光束发散角的影响。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

$$\left. \begin{aligned} r_{\perp}(z, I_{th}) &= \left[ -\omega^2 \ln \left( \frac{\omega^2 I_{th}}{I_0} \right) \right]^{1/2}, \\ \omega^2 &= \omega_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_0} \right)^2 \right], \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中  $\omega_0$  为光束束腰半径,  $\omega$  为聚焦后抽运光束腰半径,  $z_0$  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>[5]</sup>,  $E_s$  的复共轭项  $E_s^*$  的零阶展开系数  $S_0^*$  为

\* 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。

E-mail: zhaoql@public.hr.hl.cn

收稿日期: 2001-09-24; 收到修改稿日期: 2002-03-25

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

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

式中  $G_0$  为布里渊增益因子,  $k_p$ 、 $k_s$  分别为抽运光和受激散射光的波数,  $z_{in}$  为入射的抽运光的坐标,  $E_p$  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(2)式来确定, 受激散射光的光强分布为

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

根据(2)式、(3)式和(4)式, 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。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 实验装置

本文采用偏振抽取腔的结构, 充分利用激活介质的储能。实验装置如图1所示, Nd:YAG 激光器振荡级的谐振腔由全反镜  $M_1$  和部分反射镜  $M_2$  (反射率  $R = 8\%$ ) 构成, Nd:YAG 棒为  $\phi 6 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ , Q 开关选用  $\text{Cr}^{4+} : \text{YAG}$  (透射率  $T = 30\%$ ), 产生的后向受激布里渊散射相位共轭光经激活介质放大后从偏振片耦合输出。采用不同焦距的透镜和不同的受激布里渊散射介质, 用美国 Spiricon 公司生产的光束质量分析仪 (Model  $M^2-101$ ) 测量偏振抽取腔输出光的光束质量因子  $M^2$  值和发散角。

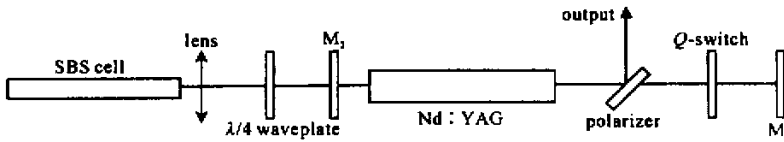


Fig. 1 Experimental setup

#### 3.2 带受激布里渊散射相位共轭镜和带普通反射镜的偏振抽取腔输出光光束质量的比较

采用以上实验装置和有关参量, 在抽运能量为 26.19 mJ, 透镜焦距为 100 mm 时, 采用  $\text{CCl}_4$  作为

受激布里渊散射介质进行了带受激布里渊散射相位共轭镜和带普通反射镜 ( $R = 99.6\%$  的平面镜) 的偏振抽取腔输出光的光束质量的比较, 测试结果如图2所示。带有受激布里渊散射相位共轭镜的偏振抽

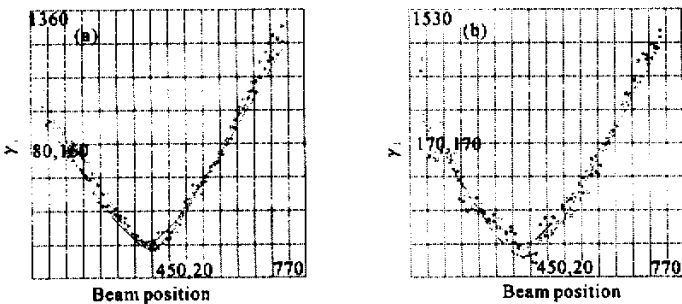


Fig. 2 Beam quality of polarex output with SBS PCM (a) and with normal total reflection mirror (b)

取腔输出光的  $M_x^2 = 1.33, M_y^2 = 1.30$ , 发散角  $\theta_x = 1.167$  mrad,  $\theta_y = 1.311$  mrad。采用普通反射镜的偏振抽取腔输出光的  $M_x^2 = 1.66, M_y^2 = 1.97$ , 发散角  $\theta_x = 1.691$  mrad,  $\theta_y = 1.796$  mrad。实验结果证实了由于受激布里渊散射具有改善光束质量、压缩束散角的作用, 因此, 采用带受激布里渊散射相位共轭镜的偏振抽取腔输出的光束质量明显优于带普通反射镜的偏振抽取腔输出的光束质量。

### 3.3 抽运能量对受激布里渊散射偏振抽取腔输出光光束质量的影响

采用  $\text{CS}_2$  作为受激布里渊散射介质, 透镜焦距为 100 mm, 测得不同抽运能量下的受激布里渊散射偏振抽取腔输出光的  $M^2$  值和发散角, 如表 1 所示。

由表 1 看出, 随着抽运光能量的增高, 受激布里渊散射偏振抽取腔输出光的发散角增大, 相应的  $M^2$  值增大, 光束质量变差。

因此从理论分析和实验结果均得到, 当抽运光强高于受激布里渊散射阈值时, 随着抽运光强增加, 激活区半径增大, 受激布里渊散射光的光束发散角随抽运光的增强而增大。

Table 1. Beam parameters of SBS polarex output with different pumping energy ( $\theta$  / mrad)

beam parameter pumping energy/mJ	$\theta_x$ /mrad	$\theta_y$ /mrad	$M_x^2$	$M_y^2$
24.75	1.392	1.680	1.58	1.68
26.19	1.395	1.692	1.60	1.74
30.06	1.614	1.984	2.10	2.40
48.37	1.893	2.342	2.36	3.07
52.06	2.015	2.610	2.59	3.54

### 3.4 透镜焦距对受激布里渊散射偏振抽取腔输出光光束质量的影响

我们保持抽运光能量一定(26.19 mJ), 以  $\text{CS}_2$  作为受激布里渊散射介质, 分别使用焦距为 50 mm、100 mm、200 mm、250 mm、300 mm 的聚焦透镜, 测得受激布里渊散射偏振抽取腔输出光光束质量参量, 如表 2 所示。

由表 2 看出, 随着透镜焦距的增大, 受激布里渊散射偏振抽取腔输出光的发散角  $\theta$  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, 使得光束在受激布里渊散射池中的聚焦深度越大,

有效相互作用长度越大, 受激布里渊散射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, 应选择合适的透镜(焦距较长)。

Table 2. Beam parameters of SBS polarex output with different lens focal lengths ( $\theta$  / mrad)

beam parameter focal length/mm	$\theta_x$ /mrad	$\theta_y$ /mrad	$M_x^2$	$M_y^2$
50	1.429	1.698	1.63	1.77
100	1.395	1.692	1.60	1.74
200	1.345	1.522	1.43	1.40
250	1.267	1.356	1.37	1.35
300	1.258	1.349	1.36	1.32

结论 通过以上理论分析和实验研究, 证实受激布里渊散射相位共轭效应和阈值效应均会使得受激布里渊散射对于抽运光而言具有压缩束散角的作用, 因此利用受激布里渊散射相位共轭镜可以明显地改善激光器的光束质量, 且结构简单实用, 效果明显。采用上述结构的受激布里渊散射偏振抽取腔输出光的光束质量要优于普通偏振抽取腔的偏振输出光。为了获得优质光束, 应考虑合适的抽运能量、较长的透镜焦距等因素, 同时还需对其它参量(受激布里渊散射介质、抽运线宽、抽运脉冲波形等)的影响做进一步的研究。

## 参 考 文 献

- [1] Dehn A, Eichler H J, Haase A *et al.*. Phase conjugation for improvement of solid state and excimer laser. *Proc. SPIE*, 1998, **3403**: 65~76
- [2] Lü Zhiwei, Liu Li, He Weiming *et al.*. Generation of high-quality tunable-duration pulses by phase conjugating mirror. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(3): 389~394 (in Chinese)
- [3] Eichler H J, Haase A, Kokta M R *et al.*.  $\text{Cr}^{4+}$ :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**(5): 409~411
- [4] Baranova N B, Zeldovich Y B. Wavefront reversal of focused beams (theory of SBS). *Sov. J. Quantum Electron.*, 1980, **10**(5): 555~560
- [5] Gavrielides A, Peterson P. Diffractive Raman scattering in focused geometry. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1986, **3**(10): 1394~1407

## Improvement of Beam Quality of Polarex Cavity with SBS

Wang Qi Yu Xin Wang Yuezhu Ju Youlun Chen Deying Jia Yongwei  
(National Key Laboratory of Tunable laser Technology, Institute of Opto-electronics,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(Received 24 September 2001; revised 25 March 2002)

**Abstract:** The phase conjugation effect and the threshold effect of stimulated Brillouin scattering (SBS) on the divergence angles of back-SBS were discussed in the theory. In the experiment, the active medium and wave-front aberration generated by optic component were compensated, the divergence angles were compressed, and the beam quality was improved by using the SBS PCM to replace the ordinary reflector in the Nd:YAG polarex. The pumping energy, lens focal length affecting the beam quality of the SBS polarex were studied.

**Key words:** stimulated Brillouin scattering; phase conjugation; divergence angles;  $M^2$

## 第四届全国光子学学术会议在绵阳举行

由中国光学学会高速摄影与光子学专业委员会和中国光学学会纤维光学与集成光学专业委员会共同主办、中国工程物理研究院流体物理研究所承办的第四届全国光子学学术会议于 2002 年 8 月 14 日至 8 月 20 日在四川省绵阳市举行。约 160 位代表出席本次大会,收到论文 170 余篇。

开幕式上大会主席侯洵院士致开幕词,中国工程物理研究院流体物理研究所副所长邓建军研究员致欢迎词。开幕式后大会安排了 5 个特邀报告,首先是中国工程院副院长杜祥琬院士作了题为“激光定向能:概念与应用”的报告,随后李景镇教授作了题为“光子晶体和光子晶体的研究发展”的报告,陈国夫研究员作了题为“飞秒激光的应用”的报告,王清月教授作了题为“飞秒纳米光子学”的报告,李淳飞教授作了题为“用于光通信的非线性全光开关”的报告。

会议设 4 个分会场,代表们就 10 个专题方向进行了广泛的交流。内容涉及:1)集成光学理论、器件及应用;2)集成光电子学与光电子器件;3)微小光学、二元光学和微加工技术;4)光纤通信技术与光纤器件;5)光纤传感器理论与技术;6)固体光子器件和非线性光学效应及材料;7)光信息处理与光计算机技术;8)高速摄影技术与瞬态光学;9)生物光子学;10)光子学的其它分支领域。

会后代表们还参观了中国工程物理研究院科技馆,亲身感受了中国核工业早期发展的艰难历程。代表们纷纷表示要发扬老一代科技工作者艰苦创业的精神,为我国光子学发展贡献力量。

会议期间还分别召开了两个与会专业委员会会议,对以往的工作与明后年的学术活动进行了讨论。

(童菲)