

文章编号: 0258-7025(2005)02-0184-04

# 利用受激布里渊散射相位共轭镜克服 激光棒热效应的实验研究

刘丹平, 胡 渝

(电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054)

**摘要** 利用受激布里渊散射(SBS)相位共轭镜(PCM)能克服单棒 Nd:YAG 的热效应,从而使光束质量提高到衍射极限。对于具有一定的热效应影响的 YAG 激光棒,采用工作在接近临界稳定区的凹-凸腔作为起始腔,通过对受激布里渊散射相位共轭腔进行优化设计,在抽运能量为 10 J,重复频率为 5 Hz 时,得到稳定输出的能量为 20 mJ,脉宽为 11.8 ns 的近衍射极限的高质量激光脉冲。

**关键词** 非线性光学;热效应;凹-凸腔;受激布里渊散射相位共轭腔

**中图分类号** O 437.2 **文献标识码** A

## Experimental Study of Overcoming Laser Rod's Thermal Effect with Stimulated Brillouin Scattering Phase Conjugation Mirror

LIU Dan-ping, HU Yu

(School of Physical Electronic, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

**Abstract** The beam quality of a single-rod Nd:YAG laser can be improved almost up to the diffraction limit by using a phase-conjugating mirror (PCM) based on stimulated Brillouin scattering (SBS). As a single Nd:YAG rod, whose thermal lens, stress birefringence and depolarization are surveyed experimentally, the stable output energy of 20 mJ with pulse duration of 11.8 ns, which has perfect beam quality, is obtained at repetition rate 5 Hz with pump energy of 10 J when the start cavity is the concave-convex cavity operating near a limit of stability in the  $g$  diagram and the SBS phase conjugation cavity is optimized.

**Key words** nonlinear optics; thermal effect; concave-convex cavity; stimulated Brillouin scattering phase conjugation cavity

### 1 引 言

固体激光器能满足空间光通信跟瞄系统对激光源的功率较大、光束质量高和远场发散角小的要求。但是它的一个主要问题是抽运热效应。由于光抽运和冷却造成的热效应,使光束波面和偏振态发生畸变,光束质量下降。

利用相位共轭镜(PCM)可以提高固体激光器的光束质量。对于功率从十瓦到几百瓦的固体激光器,利用受激布里渊散射(SBS)相位共轭镜补偿光

束相位的畸变是一种很好的方法<sup>[1]</sup>。近年来受激布里渊散射由于它的后向散射光相对于入射光有着相位复共轭关系和自调 Q 等特点,使之作为相位共轭镜而应用于激光腔,获得具有较好空间模式的激光输出脉冲,得到了广泛的研究<sup>[2~6]</sup>。但是对于这种激光器,利用受激布里渊散射相位共轭镜克服热效应得到较好效果的报道较少。

本文介绍了对于具有一定的热效应影响的 YAG 激光棒,采用工作在接近临界稳定区的凹-凸腔为起始腔,通过对受激布里渊散射相位共轭镜进

收稿日期:2003-07-24;收到修改稿日期:2004-05-25

作者简介:刘丹平(1969—),男,电子科技大学博士研究生,主要从事无线光通信及其跟瞄技术、非线性光学和激光技术的研究。E-mail:ldpsbs@163.com

行优化设计,得到了远场发散角近衍射极限的高质量激光束。

## 2 受激布里渊散射激光振荡器

实验装置如图 1 所示, YAG 棒的尺寸为  $\phi 5 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ , 聚光腔为单灯抽运紧包腔。脉冲波形由光纤探头和 Tekk TDS544pps 型示波器测量, 输出能量由 OPHIR DGX 型能量计 (ED) 测量, 采用 WAT-505EX 型 CCD 相机来测量远场能量的空间分布。He-Ne 激光器主要用于测量热透镜焦距和观察双折射现象。

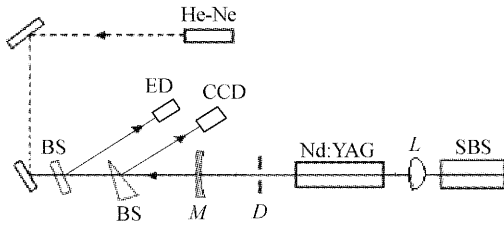


图 1 受激布里渊散射相位共轭镜的激光器实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of laser resonator with SBS PCM

选物理化学稳定性好的分析纯丙酮为散射介质, 主要是它的抽运能量在受激布里渊散射阈值附近不会出现自聚焦, 不会被击穿, 可以提高受激布里渊散射相位共轭镜的相位共轭保真度。受激布里渊散射池子长度为  $5.0 \text{ cm}$ , 池子前后表面镀  $1.06 \mu\text{m}$  增透膜。

### 2.1 受激布里渊散射振荡器的起始腔

受激布里渊散射振荡器的起始腔的作用是在抽运激光棒产生热透镜和双折射的情况下提供超过受激布里渊散射阈值的激光。

如图 1 所示, 输出镜  $M$  的反射率为  $50\%$ , 曲率半径为  $650 \text{ cm}$ 。透镜  $L$  焦距为  $5.5 \text{ cm}$ , 后凸面曲率半径为  $5.5 \text{ cm}$ , 镀  $1.06 \mu\text{m}$  增透膜, 前凸面曲率半径为  $600 \text{ cm}$ , 镀膜使该光学表面对波长  $1.06 \mu\text{m}$  的激光有  $4\%$  的反射率。所以透镜前凸面与输出镜之间可形成凹-凸稳定腔。实验表明, 用这种稳定腔作为起始腔产生的激光容易达到受激布里渊散射的阈值。

以前研究过以非稳腔为起始腔的受激布里渊散射激光器<sup>[7]</sup>, 它的阈值能量高, 稳定性差。因为腔内的光学元件吸收能量而产生的热效应、腔内光学元件的轴误差和光腔的微扰会对光束质量产生影响。

虽然非稳腔具有很大的模分辨能力和模体积, 但非稳腔涉及到较多相互制约的腔参数, 受环境及腔镜变形等因素影响大, 因而可靠性差<sup>[8]</sup>。

实验表明, 采用稳定的凹-凸腔作为起始腔不仅可以改善系统的稳定性, 还能降低阈值能量。本实验使凹-凸腔工作在接近临界稳定区,  $g$  参数分别为  $0.858$  和  $1.153$ 。此时尽管凹-凸腔的非涅耳系数较大, 但是它对应的共焦腔的非涅耳系数较小<sup>[8]</sup>。凹-凸腔对  $\text{TEM}_{00}$  模的衍射损耗很小, 基模光斑半径及模体积显著增大, 在起始腔可以得到约  $77\%$  的介质利用效率。实验中把受激布里渊散射激光器的起始腔由非稳腔改为工作在临界稳定区的凹-凸腔, 阈值能量减少了近  $5 \text{ J}$ 。

### 2.2 受激布里渊散射激光器的相位共轭腔

受激布里渊散射激光器的相位共轭腔由受激布里渊散射相位共轭镜和输出镜  $M$  组成。理想的相位共轭镜没有选模的能力, 允许多模产生, 从而在光学表面引起危险的聚焦。对图 1 针孔  $D$  和激光棒的口径进行优化设计可以保证激光的基模。根据光束的传输理论, 可以大致得到受激布里渊散射相位共轭腔内每个位置处的光束半径分布, 然后由实验得出针孔的确切直径为  $2.5 \text{ mm}$ 。

受激布里渊散射相位共轭镜的优化配置文献<sup>[7]</sup>已经进行了详细讨论, 通过短池强聚焦既有效地改善了光束质量, 又大大减少了振荡器的体积。把传统的望远系统改变成简单的一个透镜是可行的。实验证明这种系统本身具有较好的稳定性。

### 2.3 受激布里渊散射激光器的相位共轭腔失调对输出激光功率的影响

在保证抽运能量为  $10 \text{ J}$ , 重复频率为  $5 \text{ Hz}$  的相同抽运条件下, 去掉相位共轭镜和保留相位共轭镜, 分别改变输出耦合镜  $M$  的倾斜角度, 观察输出能量的变化如图 2 所示。实验表明, 在倾斜角度变化范围为  $0^\circ \sim 0.025^\circ$  时, 没有相位共轭镜时的凹-凸腔失调对输出能量的影响比相位共轭腔更敏感。在图 1 实验系统里, 凹凸腔输出能量变化了  $14 \text{ mJ}$ , 相位共轭腔输出能量变化了  $4 \text{ mJ}$ 。这说明受激布里渊散射由于相位共轭效应能补偿畸变的特性提高了系统的稳定性。

## 3 实验结果及其分析

### 3.1 激光棒的热效应测试

热透镜焦距的测量采用图 1 的实验装置。在激

光棒后面加一焦距为 50 m 的辅助透镜。光斑最亮最小时光阑位置即聚焦位置。在重复频率为 5 Hz 的抽运下,测得热透镜焦距随抽运能量的变化情况如图 3 所示,与理论计算得到数值符合得较好。

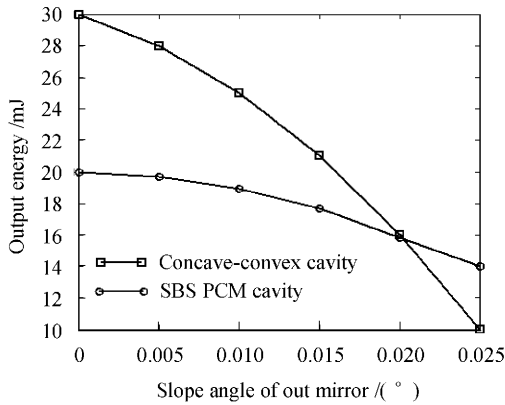


图 2 两种情况下输出能量随输出耦合镜倾斜角度的变化

Fig. 2 Output energy as a function of slope angle of output mirror

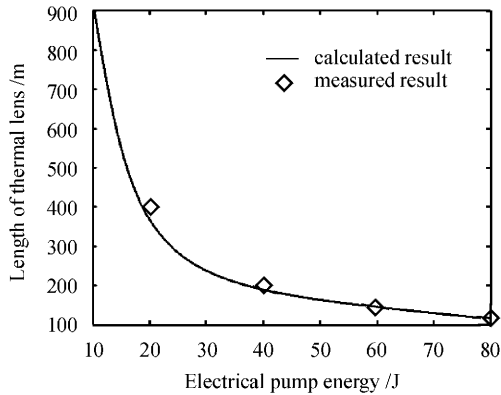


图 3 激光棒热透镜焦距随抽运能量的变化

Fig. 3 Thermal lensing of laser rod as a function of the electrical pump power

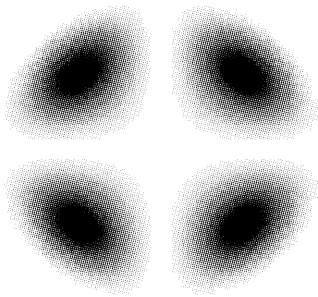


图 4 抽运输入 60 J 时观察到激光棒的退偏图样

Fig. 4 Thermal stresses in the YAG rod at 60 J input

通过观察激光在光屏上强度的变化来观察退偏现象。实验测出了 Nd:YAG 激光棒在不同抽运能

量和重复频率下的退偏花样。结果表明,抽运能量越高,退偏现象就越明显;重复频率越大,退偏越严重。图 4 是用重复频率为 5 Hz,抽运能量为 60 J,波长为 1.064 μm 的 YAG 激光照射时观察到的退偏花样,去偏约 20%。

### 3.2 受激布里渊散射激光器的输出特性

图 5 中实线是重复频率为 5 Hz 时受激布里渊散射激光器中输出能量平均值随抽运能量的变化。其他条件不变,当把 M 镜换成平面镜时激光的能量输出如虚线所示。可见,凹-凸腔作为起始腔的受激布里渊散射激光器阈值能量减少了近 5 J。

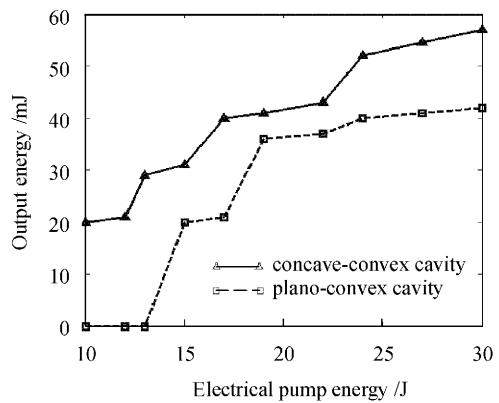


图 5 平均输出能量随抽运能量的变化

Fig. 5 Average output energy of the laser as a function of the electrical pump energy

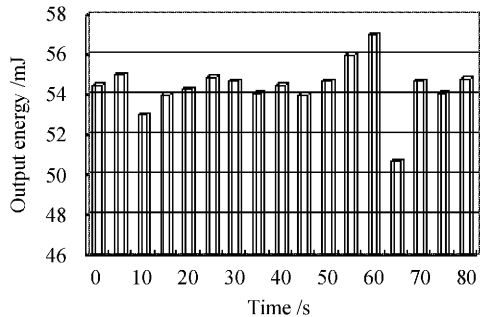


图 6 每隔 5 s 统计的受激布里渊散射激光器输出能量

Fig. 6 Output power of the laser every five minutes

为了观察激光器的稳定性,统计了受激布里渊散射激光器的能量输出状况。在抽运能量 27 J,重复频率 5 Hz 时,每隔 5 s 时间记录一次输出能量如图 6 所示。激光器能量输出均值 54.5 mJ,波动幅度较小,稳定度约 94%。与文献[9]测试的结果相比,在这个实验系统中受激布里渊散射相位共轭镜较好地抑制了热效应引起的波动。尤其是从图 7 的远场光束空间分布可以更明显地看到光束质量的改

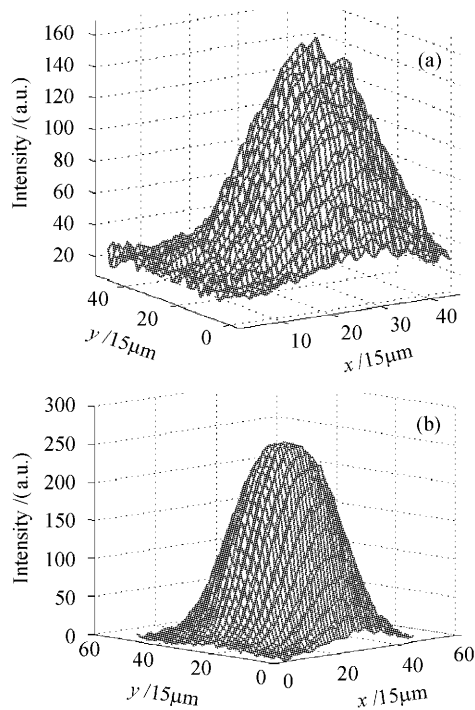


图 7 受激布里渊散射激光器激光束远场的空间分布不用(a)和采用(b)受激布里渊散射相位共轭镜

Fig. 7 Transverse far field intensity profiles of the output beam

(a) without SBS PCM; (b) with SBS PCM

善。

为了比较受激布里渊散射相位共轭镜改善热畸变的效果,对激光介质的冷却采用空冷方式,热效应的情况如图 3 和图 4 所示,激光介质畸变严重。图 7(a)为用 CCD 记录的在重复频率 5 Hz 时不用受激布里渊散射相位共轭镜时激光器输出的能量空间分布,顶端能量分布较杂乱。图 7(b)为采用了受激布里渊散射相位共轭镜后的结果。由于相位共轭镜对畸变的补偿作用,光束空间分布明显变好。可见,采用凹-凸腔起始腔的受激布里渊散射激光器光束质量改善明显。在抽运能量 10 J,重复频率为 5 Hz 时,得到稳定输出的能量为 20 mJ,  $M^2$  为 1.2 的高质量激光脉冲。

## 4 结 论

热透镜和双折射退偏是单棒 YAG 激光器不可避免的现象,但是对受激布里渊散射振荡器采用合适的激光腔作为起始腔,通过优化设计受激布里渊

散射相位共轭镜,利用受激布里渊散射这种非线性光学技术确能明显改善固体激光器的光束质量。本文测试了 YAG 棒的热透镜和双折射,采用工作在临界稳定区的凹-凸腔作为起始腔,利用优化的短池强聚焦受激布里渊散射相位共轭镜,在抽运能量 10 J,重复频率为 5 Hz 时,得到稳定输出的能量为 20 mJ,脉宽为 11.8 ns 的高质量激光脉冲。

## 参 考 文 献

- Martin Ostermeyer, Axel Heuer, Ralf Menzel. 27-W average output power with 1.2 \* DL beam quality from a single-rod Nd: YAG laser with phase-conjugating SBS mirror [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(2):372~377
- Ge Chuanwen, Zhang Weijun, Wang Pei *et al.*. Relation between Q-switch effect and primary resonator stability in phase conjugation laser based on SBS [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(11):978~982  
葛传文,张为俊,王沛等. SBS 相位共轭腔激光器的调 Q 效果与起始腔稳定性的关系[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(11):978~982
- Ge Chuanwen, Zhang Weijun, Gao Xiaoming. Self-Q-switching mechanism of SBS phase-conjugation laser resonator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(9):788~790  
葛传文,张为俊,高晓明. 受激布里渊散射相位共轭激光器自调 Q 机理的探讨[J]. *中国激光*, 2003, **30**(9):788~790
- Zhong Ming, Han Kai, Li Tong *et al.*. Characteristic investigation of (Nd, Ce): YAG laser resonator with a phase conjugating mirror based on SBBS in CH<sub>4</sub> gas [J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(10):804~808  
钟鸣,韩凯,李彤等. 用 CH<sub>4</sub> 气体 SBBS 作为相位共轭镜的 (Nd, Ce): YAG 激光谐振腔特性的研究[J]. *中国激光*, 1994, **A21**(10):804~808
- Ge Chuanwen, Zhang Weijun, Chen Changshui *et al.*. Studies on the compression of electrooptical Q-switched Cr: LiSAF laser pulse width by SBS phase conjugator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4):304~306  
葛传文,张为俊,陈长水等. 用后向 SBS 压缩电光调 Q Cr: LiSAF 激光脉冲宽度的研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(4):304~306
- Liu Qiang, Wang Yuezhu, Ju Youlun *et al.*. An induced SBS phase-conjugate resonator [J]. *Chinese J. Lasers*, 1999, **A26**(3):201~204  
柳强,王月珠,鞠有伦等. 诱导式受激布里渊散射相位共轭腔[J]. *中国激光*, 1999, **A26**(3):201~204
- Liu Danping, Feng Guoying, Ou Qunfei *et al.*. SBS YAG laser without back reflective mirror [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(2):145~146  
刘丹平,冯国英,欧群飞等. 无后向反射镜的 SBS YAG 激光器实验研究[J]. *激光技术*, 2003, **27**(2):145~146
- Wei Zaifu, Wang Runwen, Cha Hongkui *et al.*. Analysis of modes selection using stable concave-convex resonator in a high power lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(2):151~156  
魏在福,王润文,查鸿逵等. 高功率激光稳定腔选模分析[J]. *光学学报*, 1995, **15**(2):151~156
- Liu Danping, Feng Guoying, Ou Qunfei *et al.*. Cr<sup>4+</sup>: YAG Q-switched SBS laser [J]. *Laser Technology*, 2002, **26**(2):144~146  
刘丹平,冯国英,欧群飞等. Cr<sup>4+</sup>: YAG 调 Q 的 SBS 激光器[J]. *激光技术*, 2002, **26**(2):144~146