

# 百焦耳级受激布里渊散射相位共轭激光系统

王雨雷 吕志伟\* 何伟明 郑振兴 王双义

(哈尔滨工业大学光电技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要** 研制了一套输出能量在 100 J 以上的大能量高功率钕玻璃激光系统。在设计中,对光路排布进行了优化,对系统放大增益进行了数值模拟,采用像传递技术和受激布里渊散射(SBS)相位共轭技术,提高了激光束的输出质量。Nd:YLF 前端输出的单纵模脉冲激光经过两级双程放大和一级助推放大,获得了 106 J 的能量输出。针对在大口径高能高功率激光系统中应用受激布里渊散射相位共轭镜的要求,设计了一种新型的受激布里渊散射相位共轭镜结构,这种结构克服了传统独立双池的缺点,完全适用于高能高功率激光的双程放大结构。

**关键词** 激光技术; 高功率激光系统; 受激布里渊散射; 相位共轭

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

## A 100 J Laser System with Stimulated Brillouin Scattering Phase Conjugating Mirror

Wang Yulei Lü Zhiwei He Weiming Zheng Zhenxing Wang Shuangyi

(Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

**Abstract** A high-power phosphate Nd: glass laser system with 100J energy was developed. In the laser design process, the optimization of the optical layout was considered and the amplification gain of laser media was simulated. In the laser system, image relaying and stimulated Brillouin scattering (SBS) are employed to improve the quality of the output beam. A single-longitudinal mode laser pulse provided by a Nd:YLF front-end was amplified by two dual pass amplifiers and a booster amplifier, and the output energy of 106 J was obtained. In view of the requirements of SBS phase conjugating mirror employed to the high energy and high power laser system with large diameter, a new design of the SBS phase conjugating mirror was described. It is fully applicable to the high energy and high power dual pass amplification laser system.

**Key words** laser technique; high power laser system; stimulated Brillouin scattering; phase conjugation

### 1 引言

大能量、高峰值功率的激光系统在工业和科学相关研究方面都有非常重要的应用,比如用于平版印刷的 X 射线的产生<sup>[1]</sup>,汤姆孙散射<sup>[2]</sup>的等离子体诊断,惯性约束聚变(ICF)<sup>[3]</sup>等都对激光系统提出了非常高的要求,随着对激光器的能量和功率的要求越来越高,激光器的规模也越来越大,如何降低这种大型激光器的造价,提高光束质量是这类激光器发展的关键因素之一。受激布里渊散射(SBS)相位共轭技术具有的相位共轭特性和脉宽压缩特性是提高高能高功率激光系统输出光束质量,降低激光装

置造价的一种重要手段。美国<sup>[4]</sup>、日本<sup>[5]</sup>和俄罗斯<sup>[6]</sup>在这方面进行了大量的研究工作。但是由于受激布里渊散射的完全背向散射的特点,直接在大型激光器中进行受激布里渊散射的研究还较少。本文研制的高能高功率受激布里渊散射相位共轭激光系统的反向激光隔离比达到  $10^8$ ,这套系统既满足了大能量高功率受激布里渊散射的实验研究要求,又保证了高光束质量的激光输出。

### 2 技术方案

整个系统采用的是两级双程放大的设计思路,

**基金项目:** 国家自然科学基金(10476009, 60478020)和哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助课题。

**作者简介:** 王雨雷(1978—),男,河南人,讲师,博士,主要从事高功率固体激光器与非线性光学等方面的研究。

\* 通信联系人。E-mail: zw\_lu@sohu.com

使放大器工作在饱和放大状态,这在一定程度上提高了系统中放大器储能的提取效率,图1为整个系统的光路图。从前端输出的线偏振光经法拉第磁光隔离器、小孔光阑、扩束、整形形成近平顶轮廓的强度分布,利用像传递,把前端输出的优质光束无畸变地传输到棒状放大器 RA40 进行双程放大,线偏振光两次经过法拉第磁光隔离器 FR<sub>3</sub> 后,偏振态旋转 90°,透过偏振片 P<sub>7</sub>,被空间滤波器 SF<sub>2</sub> 扩束和像传递至棒状放大器 RA70-1。在整个过程中光束口径被放大了 9 倍,最后的输出口径为  $\phi 64\text{mm}$ 。在 RA70-1 这一级仍然采用双程放大,但与 RA40 的放大不同的是,这里既可以使用 0°平面反射镜反射,也可以使用受激布里渊散射相位共轭镜代替 0°平面反射镜,受激布里渊散射相位共轭镜具有完全相位共轭特性,其共轭反射波第二次通过放大器链时,可以补偿放大光路中产生的相位畸变,使输出光与

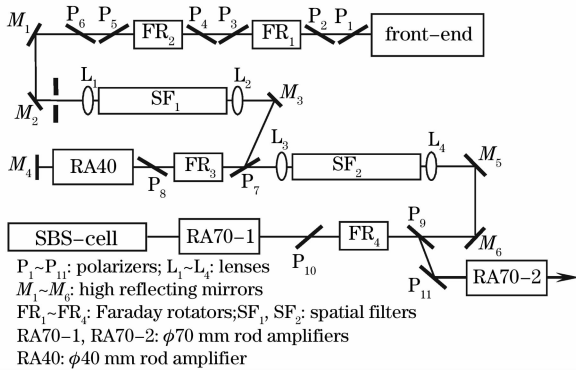


图1 系统光路图

Fig. 1 Layout of high-power laser system

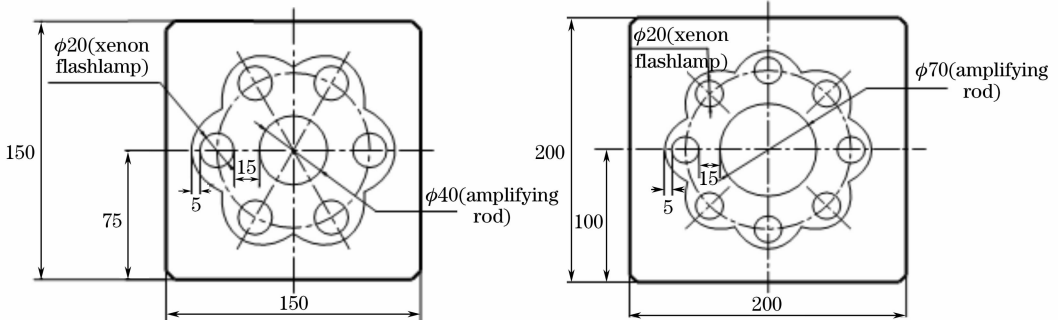
输入光具有相同的波前,从而改善光束质量。在设计中把受激布里渊散射池放在这个位置除了利用它改善光束质量之外,还由于这个位置能量大,通量高,可以为高负载条件下的受激布里渊散射特性的研究提供方便。在第一步实验当中,使用的是 0°平面反射镜。从偏振片 P<sub>9</sub> 输出的放大光经过棒状放大器 RA70-2 的助推放大,得到 100 J 的高质量激光输出。

## 2.1 前端系统

前端由振荡器,两级预放大和两级功率放大组成。激光激活介质使用的是 YLF 晶体。振荡器采用的是被动调 Q 技术,输出脉宽为 20 ns,利用泡克耳斯盒削波开关(PC)可以得到 20 ns 或 1 ns 的单纵模脉冲输出。工作重复频率是 1 Hz,输出能量可以达到 500 mJ。能量稳定性 < 3%,脉宽的稳定性 < 10%,光束发散角约为 0.35 mrad,线偏振度可以达到 99% 以上。

## 2.2 全腔水冷放大器

全腔水冷型放大器采用多椭圆镀金反射腔,结构如图 2 所示。这种构型的放大器效率高,氙灯的自吸收小<sup>[7]</sup>。激活介质选用磷酸盐钕玻璃,磷酸盐钕玻璃具有受激发射截面大,非线性折射率小,热光系数低等优点<sup>[8, 9]</sup>,它在 1053 nm 处的吸收最强,增益最大,Nd<sup>3+</sup> 的浓度与激光棒的直径成反比,这样可保证放大器所有孔径上放大率的均匀性,使放大后的激光束具有较均匀的强度分布。为了消除光学元件表面之间的反射所形成的放大自发辐射(ASE),在棒的端面都有 2°的斜角。

图2  $\phi 40\text{ mm}$  (a)和  $\phi 70\text{ mm}$  (b)棒放大器结构示意图Fig. 2 Structure of  $\phi 40\text{ mm}$  (a) and  $\phi 70\text{ mm}$  (b) rod amplifier

## 2.3 空间滤波器

空间滤波器的结构非常简单,由一对共焦的正透镜和焦平面上的滤波小孔组成。其主要作用有:1)消除高频空间调制,改善光束质量;2)扩大光束口径,实现放大级间光束匹配;3)像传递,实现光束无

畸变传输;4)光隔离,抑制放大级间的自激振荡和隔离反向激光。在设计空间滤波器时,需要考虑透镜的形状和焦距,以及滤波小孔的大小与形状,而这两个因素又是相互影响的。

决定空间滤波器最佳长度(两透镜焦距之和)的

因素有两个<sup>[10]</sup>:首先由成像性质决定,即在两个空间滤波器之间能放下所需要的所有元件。同时,还要考虑,腔全反镜应位于系统的像传递面上。最佳滤波器长度  $L_f = L_N/M$ ,  $L_N$  是两个空间滤波器之间的光学距离,  $M$  为滤波器的放大率;第二个决定因素是考虑防止在滤波器小孔处形成等离子堵口现象。因为焦斑的大小和焦距有关,焦斑强度与焦斑和能量有关,所以在设计焦距时由于输入能量已定,因而只能考虑焦距,以焦斑处的强度小于等离子形成的阈值为条件,考虑焦距的大小。另外,根据激光等离子体物理实验的结果,应该使每级空间滤波器小孔边缘的激光功率密度不大于  $10^{12}$  W/cm<sup>2</sup><sup>[11]</sup>,以避免等离子体堵口效应对激光束的影响。针对这套系统,计算的结果是 SF<sub>1</sub> 的透镜焦距只要大于 15 cm 即可(焦斑按一倍衍射限来计算)。SF<sub>2</sub> 的透镜焦距只要大于 44 cm 即可(焦斑按 10 倍衍射限计

算)。根据该设计原则,详细计算了两个空间滤波器透镜的形状和焦距,并根据得到的结果计算了鬼点的位置,在实际的光路中,尽量使光学元件避开这些具有破坏性的鬼点。

### 3 能量模拟计算

设计放大器时,根据所需要的增益选取激光棒的长度,根据激光棒的损伤阈值,选择棒的直径。在这套系统中,放大级棒的尺寸为  $\phi 40$  mm  $\times$  360 mm 和  $\phi 70$  mm  $\times$  360 mm。对于脉冲远小于放大介质荧光寿命的短脉冲,放大取决于能量密度。

对放大器的增益特性进行了数值模拟,表 1 列出了模拟的结果,在图 3 中,给出了系统中各个部分的能流分布。在进行数值模拟时,把受激布里渊散射池考虑在其中,并假定受激布里渊散射相位共轭镜的能量反射率为 60%。

表 1 放大器的模拟结果

Table 1 Results of simulation

		$g_0/\text{cm}^{-1}$	$E_{in}/(\text{J}/\text{cm}^2)$	$E_{out}/(\text{J}/\text{cm}^2)$	Input energy /J	Output energy /J
$\phi 40$ mm	Single-pass	0.079	0.036	0.48	0.5	122.5
	Double-pass	0.076	0.480	1.54		
$\phi 70$ mm	Single-pass	0.045	0.310	1.12		
	Double-pass	0.034	0.670	2.13		

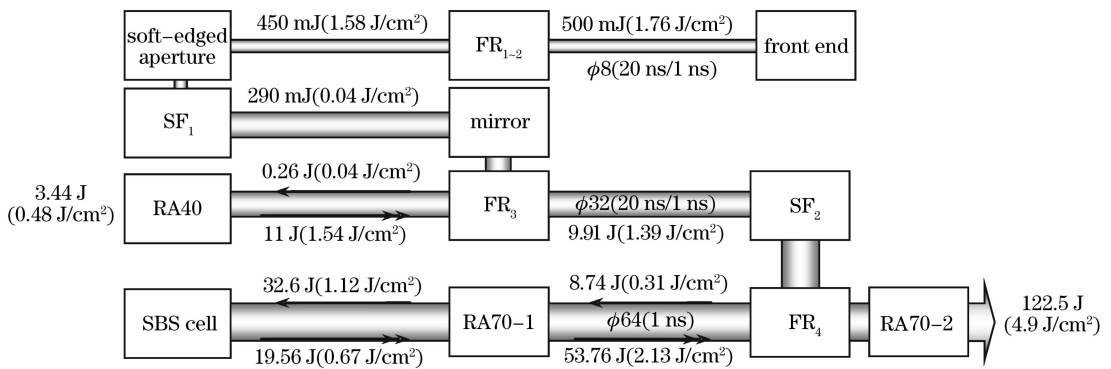


图 3 能流分布图

Fig. 3 Diagram of the amplifier energy chain

### 4 实验结果

根据不同的实验需要,这套系统可以在较长脉冲(20 ns)的时候,输出一个较大的能量( $>100$  J),也可以在较短脉冲(1 ns)的时候,输出一个较大的峰值功率( $>10$  GW),光滑的输出时间波形如图 4 所示。

为了尽量降低激光放大器抽运后剩余的热沉积

对激光输出质量的影响,系统每 20 min 工作一次。为了测试系统的能量输出稳定性,把连续 10 发次的输出能量列于表 2 中,平均输出能量为 105.6 J,能量稳定度为 6%。为了避免在高峰值功率时激光棒会产生自聚焦破坏,在脉宽为 1 ns 时,只得到两发数据,能量分别是 10.2 J 和 13.1 J。

表 2 激光器能量输出

Table 2 Energies of output

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Energy /J	94.7	102.9	106.3	105.5	115.5	104.6	99.6	110.7	109.7	106.6

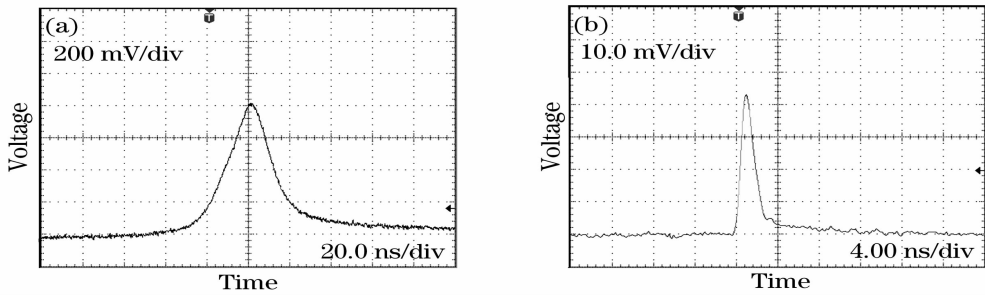


图4 激光器输出时间波形(a) 20 ns, (b) 1 ns

Fig. 4 Laser pulse temporal shape of (a) 20 ns, (b) 1 ns

## 5 高能高功率受激布里渊散射相位共轭镜

为满足高能高功率受激布里渊散射相位共轭实验研究而设计的受激布里渊散射相位共轭镜结构<sup>[12]</sup>如图5所示。这种结构既具有紧凑双池的输入与输出光同轴同偏振态的优点,又具有独立双池的种子抽运光与放大抽运光强度可调的优点,适用于带有相位共轭镜的同轴双程激光放大系统<sup>[13]</sup>。高能高功率激光系统中输出的激光通过1/2波片和

偏振片 $P_1$ 可以有效控制注入产生池用于产生斯托克斯(Stokes)种子的种子抽运光和用于斯托克斯光放大的放大抽运光之间的强度比。没有完全被抽空的放大抽运光在偏振片 $P_3$ 处被反射出光路,避免了在受激布里渊散射产生池再次产生斯托克斯光,影响最后的激光输出特性。通过调整延时线,可以调整放大抽运光和斯托克斯种子光在受激布里渊散射放大池中的相遇位置,使斯托克斯种子光得到最有效地放大。

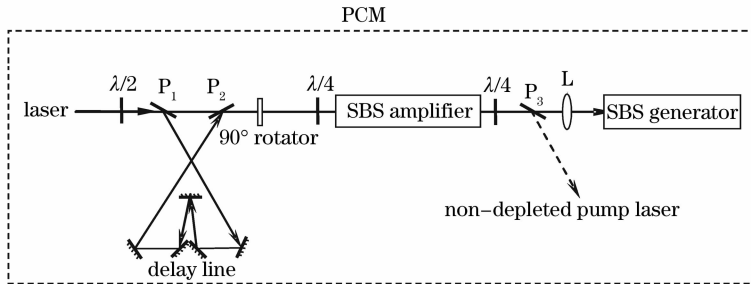


图5 高能高功率受激布里渊散射相位共轭特性实验装置图

Fig. 5 Experiment setup for high energy and high power SBS phase conjugation characters

## 6 结 论

研制了一套带有受激布里渊散射相位共轭镜的高能高功率激光系统。当输出激光的脉冲宽度为20 ns时,输出能量大于100 J,能量的稳定性小于6%,输出光束的近场光斑强度分布均匀,光束质量好。在激光系统的设计当中引入了一种新型的受激布里渊散射相位共轭镜,实验结果证明了这种结构具有较高的效率和能量负载能力。

**致谢** 在实验的过程中得到了中国工程物理研究院的丁磊和蒋东斌等人的大力支持,在此表示感谢!

## 参 考 文 献

1 Akira Endo. High power laser plasma EUV light source for

lithography[C]. *SPIE*, 2004, **5448**: 704~711  
 2 Mao Jianshan, Zhao Junyu, Li Yadong *et al.*. HT-7 multipoint Nd laser Thomson scattering apparatus[J]. *Plasma Science and Technology*, 2001, **3**(2): 691~702  
 3 C. Brent Dane, William A. Neuman, Lloyd A. Hackel. High-energy SBS pulse compression[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(8): 1907~1915  
 4 C. Brent Dane, William A. Neuman, Lloyd A. Hackel *et al.*. Fidelity fluctuation in SBS phase conjugation at high input energies[C]. *SPIE*, 1992, **1626**: 308~316  
 5 Kmetik Viliam, Yoshida Hidetsugu, Fujita Hisanori *et al.*. Very high energy SBS phase conjugation and pulse compression in fluorocarbon liquids[C]. *SPIE*, 2000, **3889**: 818~826  
 6 V. N. Alekseev, V. V. Golubev, D. I. Dmitriev *et al.*. Investigation of wavefront reversal in a phosphate glass laser amplifier with a 12-cm output aperture[J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1987, **17**(4): 455~458  
 7 He Shaobo, Zheng Wanguo, Yu Haiwu *et al.*. Research of single segment laser amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(9):

- 769~774  
贺少勃,郑万国,於海武等. 单通激光片状放大器的模拟计算分析[J]. 中国激光, 2003, **30**(9): 769~774
- 8 Jiang Zhonghong. ICF laser glasses[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1265~1276  
姜中宏. 用于激光核聚变的玻璃[J]. 中国激光, 2006, **33**(9): 1265~1276
- 9 Gu Yalong, Zhu Jianqiang. Small-scale self-focusing of divergent beams[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1734~1738  
顾亚龙,朱健强. 发散光束小尺度自聚焦特性的研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(11): 1734~1738
- 10 Meng Shaoxian. Suppression of self-focusing through spatial filtering and relay imaging in a high power laser system[J]. *Laser and Optoelectronics*, 1998, **9**: 8~12  
孟绍贤. 高功率激光系统通过空间滤波和中继成像抑制自聚焦[J]. 激光与光电子学进展, 1998, **9**: 8~12
- 11 J. M. Auerbach, N. C. Holmes, J. T. Hunt *et al.*. Closure phenomena in pinholes irradiated by Nd laser pulses[J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(14): 2495~2499
- 12 Lü Zhiwei, Wang Yulei, He Weiming *et al.*. A new method of high power stimulated Brillouin scattering phase conjugating mirror employed in the dual pass laser amplification[P]. Chinese Patent, 200510010380.8, 2005  
吕志伟,王雨雷,何伟明等. 高能量高功率受激布里渊散射共轭镜的激光双程放大装置[P]. 中国发明专利, 200510010380.8, 2005
- 13 Wang Yulei, Lü Zhiwei, He Weiming *et al.*. Investigation on a high energy stimulated Brillouin scattering phase conjugating mirror[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(2): 883~888  
王雨雷,吕志伟,何伟明等. 一种大能量受激布里渊散射相位共轭镜的研究[J]. 物理学报, 2007, **56**(2): 883~888