

一种大能量受激布里渊散射 相位共轭镜的研究*

王雨雷 吕志伟† 何伟明 张 祎

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150001)

(2006 年 6 月 15 日收到, 2006 年 7 月 10 日收到修改稿)

提出了一种可以满足大能量高峰值功率受激布里渊散射(SBS)相位共轭镜要求的独立双池结构,这种结构用在双程激光放大光路中可以补偿单程放大光路产生的动态和静态相位畸变.在 7.1 J 的入射能量下,最终得到了大于 13 J 的能量输出.相位共轭镜的能量反射率大于 65%,相位共轭保真度达到 90%,并且比较了以 0°平面反射镜和以 SBS 相位共轭镜为腔镜的双程激光放大的输出结果,结果表明使用了 SBS 相位共轭镜之后,即使在大能量抽运的条件下也能得到很好的近场和远场保真度.

关键词:受激布里渊散射,相位共轭镜,双程放大激光器,保真度

PACC:4265C,4265F

1. 引 言

随着惯性约束聚变(ICF)研究的不断深入,需要建造大型的高功率固体激光器,为了使具有均匀近场的光束在放大器链中无畸变地传输,人们使用了像传递元件和波前补偿元件,使得激光装置的规模不断扩大,建造费用也越来越昂贵.受激布里渊散射(SBS)相位共轭技术具有补偿波前相位畸变、结构简单、造价低廉、实时修复等优点,把这一技术运用到 ICF 激光驱动器中可以降低对光学元件的光学加工要求,从而显著降低造价^[1-3].美国、日本和俄罗斯在这方面作了较多的研究^[4-6].显然,在高功率激光系统中使用 SBS 相位共轭镜可以提高输出激光的质量^[7].因此,把相位共轭镜(PCM)运用到输出在 10—100 J 的激光系统中是很必要的^[8].但是,由于光学击穿、自聚焦和热载等非线性过程的影响,目前给出有效数据的 SBS 相位共轭镜的入射能量还都低于 5 J^[9].为了提高 SBS 相位共轭镜的负载,同时为了满足激光双程放大,以便提高放大器的能量提取效率和补偿放大光路中的相位畸变的要求,本文改进了独立双池的相位共轭镜的结构,在这种结

构下,实现了大能量抽运的 SBS 高反射率和高保真度.

2. 实验装置

图 1 是实验装置示意图.从 Nd:YLF 激光器输出的单脉冲激光能量可以达到 300 mJ 左右,脉冲宽度约为 20 ns(FWHM).放大器部分使用了一台直径为 $\Phi 40$ mm 的棒状放大器和一台直径为 $\Phi 70$ mm 的棒状放大器.其中, $\Phi 40$ 棒状放大器这一级放大采用的是以 0°全反镜为腔镜的双程放大, $\Phi 70$ 棒状放大器这一级放大采用的是以 SBS 相位共轭镜为反射腔镜的双程放大.系统中的两台空间滤波器的主要作用是:把一小口径光束扩束到与放大器口径相匹配,同时兼顾滤波和像传递的作用.法拉第磁光隔离器在整个系统中起到了把激光耦合输入和输出激光放大级的作用,并且可以隔离反向激光,起到保护前端的作用.系统的工作波长是 1053 nm.实验中选用 CCl_4 作为 SBS 介质,它具有短的声子寿命,约为 0.6 ns,布里渊增益系数 $g = 6$ cm/GW,在波长为 1 μm 时光学吸收很小^[10].

简单的 SBS 单池结构或双池结构无法满足大能

* 国家自然科学基金(批准号:10476009,60478020,60278033)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: lvzw@hit.edu.cn

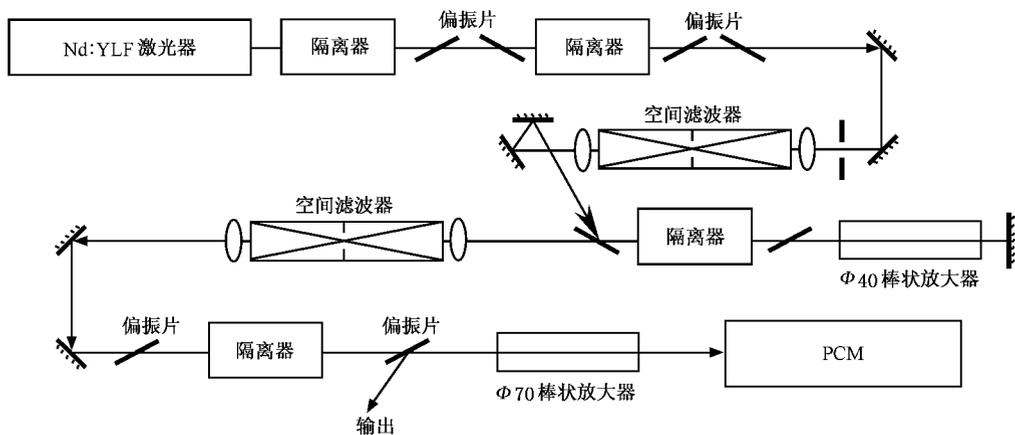


图 1 大能量 SBS 相位共轭特性的实验光路示意图

量、高峰值功率的工作条件,为此,设计了一种结构紧凑,调试方便的独立双池结构,如图 2 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^[11].通过 1/2 波片和偏振片 P_2 可以有效控制注入产生池用于产生 Stokes 种子的种子抽运光和用于 Stokes 光放大的放大抽运光之间的强度比.楔形板对放大抽运光和放大后的 Stokes 光进行取样,用 Ophir 能量探测器 ED1 和 ED2 分别测试这两束光的能量,时间波形用快响应光电探头 PIN1 和 PIN2 探测,用数字示波器 TDS684A 记录.没有完全被抽空的放大抽运光在偏振片 P_4 处被反射出光路,避免了在 SBS 产生池再次产生 Stokes 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 Stokes 种子光在 SBS 放大池中的相遇位置,使 Stokes 种子光得到最有效的放大.SBS 相位共轭光被放大器再次放大后在偏振片 P_1 处反射输出.

采用阵列相机测量激光束在各个位置处的发散角,通过比较远场发散角的变化,得到 SBS 相位共轭保真度.

3. 实验结果与分析

3.1. SBS 相位共轭镜能量反射率

定义 SBS 相位共轭镜的能量反射率为 $\eta = E_o/E_i$,其中 E_o 是放大后的 Stokes 光输出, E_i 是相位共轭镜的总注入能量, $E_i = E_s + E_p$, E_s 和 E_p 分别是用于产生 Stokes 种子光的抽运能量和用于 Stokes 放大的抽运能量,可以通过旋转二分之一波片调节这两部分的能量比.这个定义反映了这种独立双池结构的总能量反射率,它比单池结构下的能量反射率低^[12,13].这是因为根据这个定义,在最终的结果中包含了较大的介质吸收损耗和镜面反射损耗.

图 3 给出了用于产生 Stokes 种子光的抽运能量

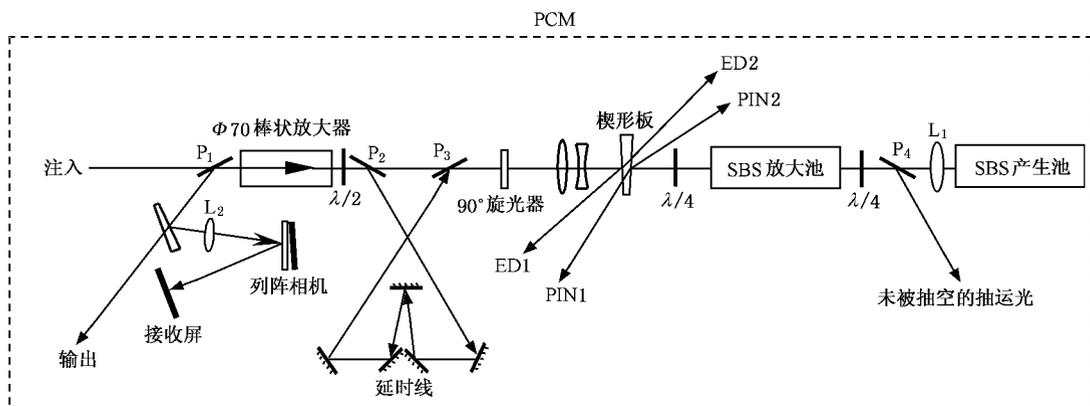


图 2 大能量受激布里渊散射相位共轭镜结构

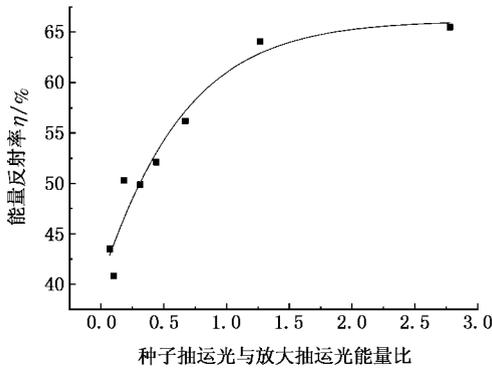


图3 种子抽运光与放大抽运光的能量比对 SBS 相位共轭镜能量反射率的影响

和用于 Stokes 放大的抽运能量比 $R = E_s/E_p$ 对 SBS 相位共轭镜能量反射率的影响.从图中可以看出,随着种子抽运光和放大抽运光能量比的增加,能量反射率在不断的增加,当比值大于 1.6 时,能量反射率逐渐趋于饱和.主要的原因有两个方面,一是在放大池中能量提取效率的影响,能量提取效率随种子抽运光与放大抽运光能量比的增加而增加.在种子抽运光与放大抽运光能量比较小时,能量提取效率增加很快,在种子抽运光与放大抽运光能量比较大时,能量提取效率增加缓慢^[14].另一方面的原因是随着种子抽运光与放大抽运光能量比的增加,产生池中 Stokes 种子光的反射率在不断增加,当比值大于 1.6 时,产生池的反射率已经饱和.

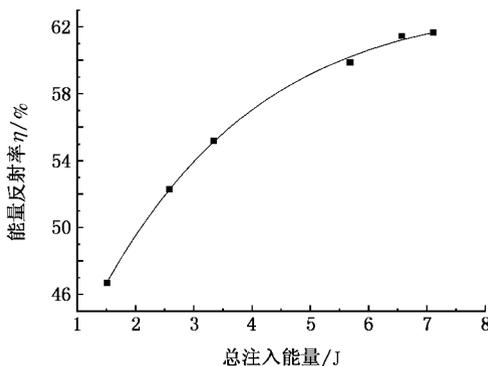


图4 SBS 相位共轭镜能量反射率与注入能量的变化趋势

图 4 给出了在种子抽运光和放大抽运光的能量比固定不变的情况下,总注入能量的变化对相位共轭镜能量反射率的影响.通过图中的曲线可以发现,随着注入能量的不断增加,即放大抽运光的功率密度不断增加,反射率不断提高,在较高能量注入的情况下,相位共轭镜仍有较高的能量反射率,这个结果

与放大池的能量提取效率和种子光放大率随抽运光功率密度的增加而增加^[15]这一结论是一致的.经过 SBS 放大池放大的 Stokes 光再次被 $\Phi 70$ 棒状放大器放大,放大后的激光输出能量 E 的值列入表 1 中.

表 1 最终输出的能量 E 与总注入能量 E_i 的值

E_i/J	1.51	2.58	3.34	5.68	6.57	7.11
E/J	2.12	4.05	5.54	10.19	12.11	13.06

3.2. SBS 相位共轭镜保真度

受激布里渊散射的一个重要特性就是相位共轭特性,可以用相位共轭保真度来衡量这一特性,在实验中 SBS 相位共轭保真度的测量^[16]是采用列阵相机分别测量入射光和散射 SBS 输出光能量角^[17]分布的方法进行的,实验光路如图 2 所示.改变种子抽运光和放大抽运光的能量比,得到不同的保真度,不同分束比下的远场发散角分布如图 5 所示,相应的远场保真度的结果列于表 2 中.可以看出,保真度的起伏还是很大的,这是因为 CCl_4 的击穿阈值较低^[18]在实验中介质会产生击穿现象造成的,但也并不排除一些实验因素的影响,例如屏是否与光轴垂直,屏是否在焦点处等等.当分束比是 1.5 时保真度最好,在 86% 能量处的发散角是 0.35 mrad.

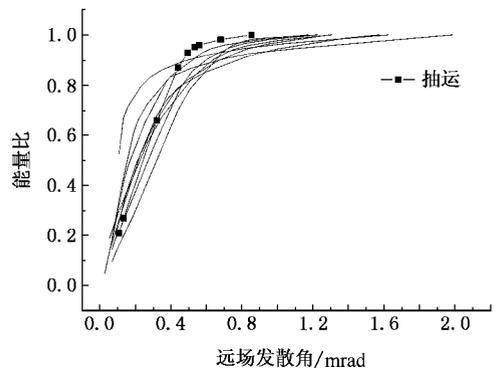


图5 抽运光和相位共轭光的发散角

表 2 各个分束比下的保真度

能量比	14.3	9.7	5.5	3.2	2.3	1.5	0.8	0.4
保真度 / %	92.3	99	98.4	90.2	87.2	99.2	88.4	80

当激光光束在大型玻璃激光系统中传输时,由于光学元件中的颗粒和瑕疵会形成辐射噪声,影响近场的光强分布,因此降低光束截面上的辐射噪声对提高光束的平均光强是很重要的^[19].在激光系统中使用 SBS 相位共轭镜得到了较好的近场保真度.

由于目前还不能像远场保真度那样给出一个确切的近场保真度的定义,因此通过比较输入与输出光束的近场的强度分布来定性地反映近场保真度.图 6 就是 SBS 相位共轭镜的输入光束和输出光束,其中图 6(a)是输入光束,图 6(b)是使用 0° 全反镜替代 SBS 相位共轭镜后的输出光束,图 6(c)是使用了 SBS 相位共轭镜后的输出光束.从图 6 中可以看出,

由于在放大光路中存在着辐射噪声源,当使用 0° 全反镜时,两次通过放大光路后,光束截面上的强度起伏会加倍,从而使输出光束的质量相对于输入光束变的很差.而使用了 SBS 相位共轭镜后,可以得到一个较均匀的输出光束.由于最后的光束输出是由偏振片反射 S 偏振光输出的,因而在输出光束中存在干涉条纹.三个光斑的强度分布截面图如图 7 所示.

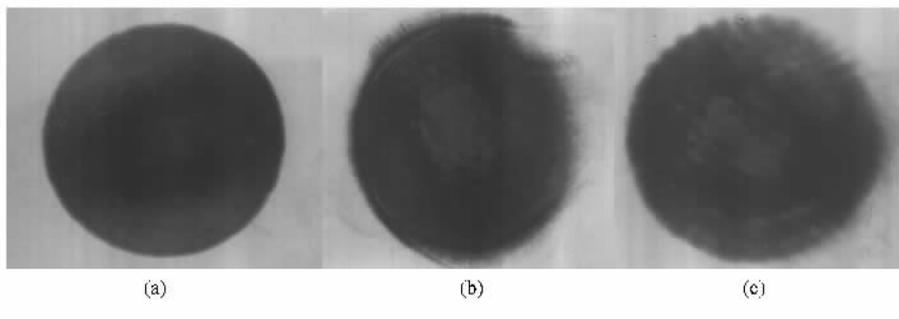


图 6 近场光斑 (a) 输入光束近场 (b) 使用 0° 全反镜的输出光束近场 (c) 使用 SBS 相位共轭镜的输出光束近场

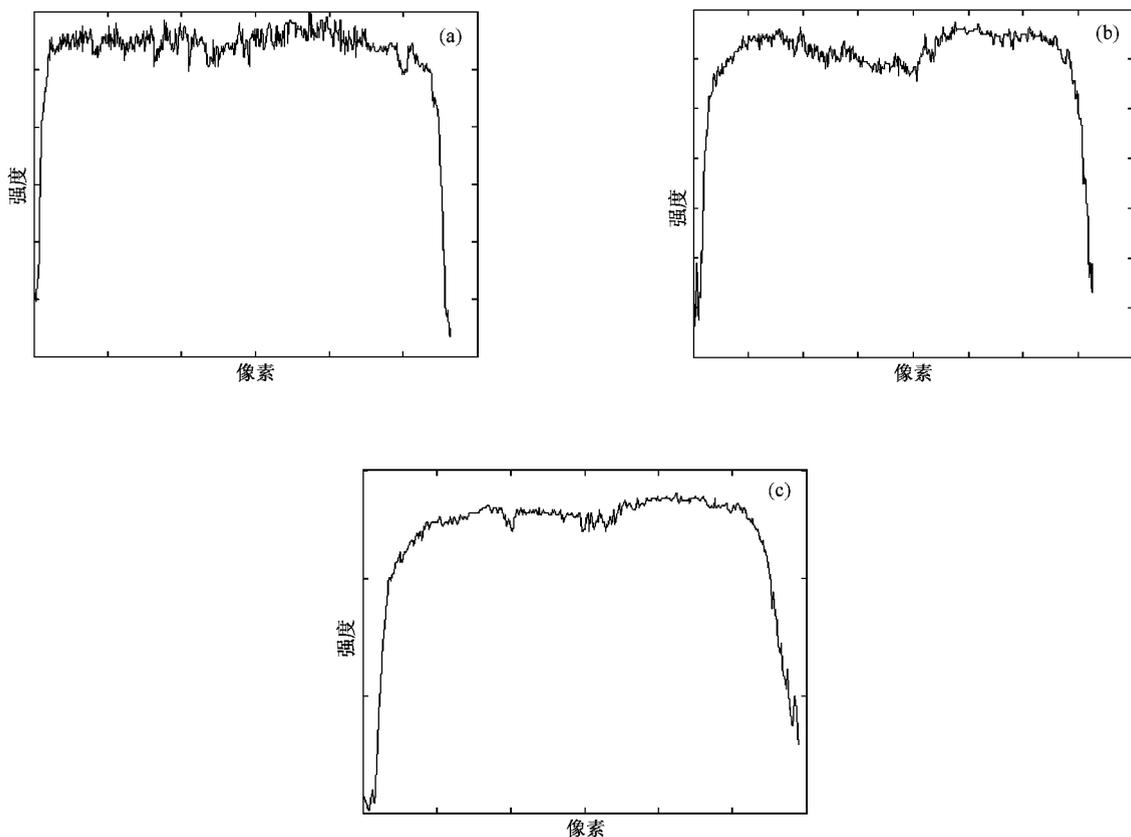


图 7 强度分布图 (a) 输入光束近场强度分布 (b) 使用 0° 全反镜的输出光束近场强度分布 (c) 使用 SBS 相位共轭镜的输出光束近场强度分布

4. 结 论

将一种改进型的独立双池 SBS 相位共轭镜结构运用到高功率大能量的双程放大的激光系统中,得到了高光束质量的激光输出,输出能量为 13 J. 在大能量抽运的条件下,对 SBS 的能量反射率和相位共轭保真度进行了研究,实验结果表明,采用这种独立

双池结构,可以满足大能量高功率 SBS 的实验要求,这为进一步提高 SBS 的负载,把 SBS 相位共轭镜作为高功率激光器中一个稳定可靠的元件,从而实现改善高功率激光器的输出光束质量的目的奠定了实验基础.

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.

- [1] Eimerl D , Chernyak V M , Pergament M I , Smimov R V , Sokolov V I 1997 *SPIE* **2633** 36
- [2] Yashin V E 1997 *SPIE* **2633** 412
- [3] Wen G J , Lu J X , Fan D Y , Deng X M 1997 *SPIE* **2633** 554
- [4] Dane C B , Neuman W A , Hackel L A 1992 *SPIE* **1626** 297
- [5] Viliam K , Hidetsugu Y , Hisanori F , Masahiro N , Tatsuhiko Y 2000 *SPIE* **3889** 818
- [6] Alekseev V N , Golubev V V , Dmitriev D I *et al* 1987 *Sov. J. QE.* **17** 455
- [7] Rockwell D A 1988 *IEEE J. Quantum Electron* **24** 1124
- [8] Rockwell D A , Mangir M S , Ottusch J J 1993 *Int. J. Nonlinear Opt. Phys.* **2** 131
- [9] Mangir M S , Rockwell D A 1993 *J. Opt. Soc. Am. B* **10** 1396
- [10] Lü Z W , Lü Y L , Yang J 2003 *Chin. Phys.* **12** 41
- [11] Lü Z W , Wang Y L , He W M *et al* 2005 *Chinese Patent* 200510010380.8 [in Chinese] 吕志伟、王雨雷、何伟明等 2005 中国发明专利 200510010380.8]
- [12] Schelonka L P , Clayton C M 1988 *Opt. Lett.* **13** 42
- [13] Mocofanescu A , Babin V , Riesbeck T *et al* 2003 *SPIE* **5120** 189
- [14] Ding Y C , Lü Z W , He W M 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2767 [in Chinese] 丁迎春、吕志伟、何伟明 2002 物理学报 **51** 2767]
- [15] Lü Z W , Ding Y C , He W M 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1286 [in Chinese] 吕志伟、丁迎春、何伟明 2002 物理学报 **51** 1286]
- [16] He W M , Han S W , Lü Z W 2001 *Laser Journal* **22** 18 [in Chinese] [何伟明、韩松巍、吕志伟 2001 激光杂志 **22** 18]
- [17] He W M , Lü Z W , Wang Q 1997 *Acta Opt. Sin.* **17** 831 [in Chinese] 何伟明、吕志伟、王 骐 1997 光学学报 **17** 831]
- [18] Hasi W L J , Lü Z W , He W M , Li Q , Ba D X 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5655 [in Chinese] 哈斯乌力吉、吕志伟、何伟明、李强、巴德欣 2005 物理学报 **54** 5655]
- [19] Bruno M , Van Wonterghem , John R. Murray *et al* 1997 *Appl. Opt.* **36** 4932

Investigation on a high energy stimulated Brillouin scattering phase-conjugate mirror^{*}

Wang Yu-Lei Li Zhi-Wei[†] He Wei-Ming Zhang Yi

(*Institute of Opto-electronics ,Harbin Institute of Technology ,Harbin 150001 ,China*)

(Received 15 June 2006 ; revised manuscript received 10 July 2006)

Abstract

A novel dual-cell Brillouin oscillator-amplifier phase conjugate mirror for high energy and high peak power operation in double-pass solid state laser amplifier is described. Correction of static aberration and dynamic aberration induced in single-pass amplifier was achieved in the second passage through the aberrating medium under the condition of using the stimulated Brillouin scattering phase conjugate mirror as reflector. Output energy of 13 J was obtained with input energy of 7.1 J. An energy reflectivity of 65% and a conjugation fidelity of 90% were achieved by the use of this dual-cell phase conjugate mirror. Finally, the performance of this kind of SBS reflector in a double-pass amplifier has been compared to that of a flat mirror. The results show that the SBS reflector is highly effective in correcting the spatial aberrations of laser radiation. Excellent near-and far-field conjugation fidelities were obtained even with high input energy.

Keywords : stimulated Brillouin scattering , phase conjugating mirror , double-pass amplifier , fidelity

PACC : 4265C , 4265F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10476009 ,60478020 ,60278033).

[†] Corresponding author. E-mail : lvzw@hit.edu.cn