

# 基于布里渊放大的非共线四束激光串行组束的研究<sup>\*</sup>

王雨雷 吕志伟<sup>†</sup> 王双义 郑振兴 何伟明

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所 哈尔滨 150080)

(2008 年 10 月 25 日收到, 2008 年 11 月 17 日收到修改稿)

理论上分析了基于布里渊放大的非共线组束结构中组束效率的影响因素, 结果表明, 当 Stokes 种子光和抽运光的夹角限制在 90 mrad 范围内时, 组束效率可以达到 80% 以上. 根据数值模拟的结果, 设计了非共线四束激光组束的实验, 实现了四束工作频率为 10 Hz, 能量分别为 70.4 mJ, 71.3 mJ, 78.9 mJ, 70.1 mJ 的激光组束, 组束输出能量为 189 mJ. 为了进一步简化结构和降低系统损耗, 设计了适用于多束激光非共线组束的介质池结构.

关键词: 激光组束, 受激布里渊散射, 相位共轭, 布里渊放大

PACC: 4265C, 4265F

## 1. 引言

高重复频率的固体激光可以广泛地应用于军事、科研和工业等领域, 诸如惯性约束聚变<sup>[1,2]</sup>、激光制导、空间光通信、材料加工<sup>[3,4]</sup>等方面. 但由于晶体生长技术、热畸变和损伤阈值等因素的影响使得单束激光的输出能量受到了限制.

激光组束是一种通过对多束小能量、低功率激光进行合成来获取大能量、高功率激光输出的技术手段. 利用激光组束可以实现一定重复频率的几十焦耳至几千焦耳输出<sup>[5]</sup>. 现有的组束方法中, 在固体脉冲激光器方面多是利用非线性光学相位共轭原理来实现. 其中受激布里渊散射(SBS)相位共轭并行组束是一种重要的方法<sup>[6]</sup>. SBS 相位共轭并行组束主要分为重叠耦合并行组束<sup>[7]</sup>、后向注入种子光并行组束<sup>[8]</sup>和独立介质池并行组束<sup>[9]</sup>. 重叠耦合并行组束和后向注入种子光并行组束由于都是把多束激光聚焦在同一个介质池中, 因此系统的负载不高, SBS 后向反射率较低. 针对这两种方法负载不高的特点, Kong 等人<sup>[10]</sup>提出了独立介质池 SBS 并行组束的方案, 其特点是, 每个子光束采用一个独立的介质池来实现相位共轭, 分散了系统的负载. 但由于各介质池之间是相互独立的, 因此为了得到较好的组束

效果, 需要对每个子光束的相位和能量进行精确的控制, 增加了系统的复杂性和操作难度. 基于布里渊放大的串行组束方法<sup>[11]</sup>具有高负载的特点, 并且这种方法是多束抽运光放大同一束种子光, 在放大过程中抽运光的相位和 Stokes 种子光的相位始终是匹配的, 因此具有较高的效率和优质的光束质量. 然而, 在串行组束方法中, 要想获得最大的布里渊放大效率, 要求抽运光和种子光在放大过程中应是完全共线的<sup>[12]</sup>. 这种共线串行结构中, 需要使用偏振片和波片实现抽运光和种子光的注入与耦合输出. 随着组束束数的增加, 由于大量偏振片和波片的使用会使结构变得越来越复杂. 为了简化结构, 增加实用性, 采用了抽运光与种子光非共线的结构. 这种结构中抽运光和种子光可以直接注入与输出, 不需要使用偏振片与波片, 因此结构十分简单. 然而, 对于非共线组束结构, 获得高的组束效率是该结构研究的重点. 文中对这种结构的组束效率进行了分析, 并在实验上实现了高效的四束激光组束.

## 2. 理论模拟

非共线布里渊放大的数值计算模型如图 1 所示. 不同于共线布里渊放大的结构, 在非共线布里渊放大结构中, Stokes 光与抽运光之间存在一个夹角

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 60878005), 国家高技术研究发展计划和哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: zw\_lu@sohu.com

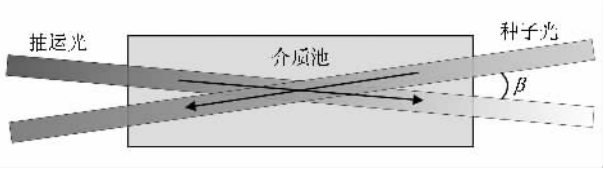


图 1 非共线布里渊放大数值计算模型

$\beta$ . 抽运光和 Stokes 光可以直接注入到布里渊介质池中, 放大后的 Stokes 光也可以直接输出, 不再需要通过偏振片和波片来提取放大后的 Stokes 光, 减少了光学元器件的应用, 降低了系统损耗, 具有更高的输出效率. 实验中激光光束为圆柱形光束, 因此, 两相交光束在介质池内的重叠体积即为有效相互作用体积  $V$ , 其除以光束的截面积  $S$ , 定义为有效相互作用长度, 设光束的口径为  $d$ . 非共线结构介质池中的有效相互作用长度为

$$L_{\text{eff}} = V/S = \begin{cases} \frac{4}{3\pi} \frac{d}{\cos\alpha \sin\alpha}, & (L_m \leq L), \\ (V_1 + V_2 + V_3 + V_4)/S, & (L_m > L), \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} S &= \pi d^2/4, V_1 = \frac{d^3}{3\sin\alpha \cos\alpha}, \\ V_2 &= \left( \frac{\pi}{4\cos\alpha} - \frac{\arcsin(L\sin\alpha/d)}{2\cos\alpha} \right) d^2 L, \\ V_3 &= \frac{\sin^2\alpha}{6\cos\alpha} \sqrt{\left[ \left( \frac{d}{\sin\alpha} \right)^2 - L^2 \right]^3}, \\ V_4 &= -\frac{d^2}{2\cos\alpha} \sqrt{\left( \frac{d}{\sin\alpha} \right)^2 - L^2}, \end{aligned}$$

$\alpha = \beta/2$ ,  $L$  为介质池长,  $L_m$  为相交体积的长度. 假设激光光束是光线模型, 在一维瞬态情况下, 非共线布里渊放大过程就可以看作是一个波矢失配的布里渊放大过程. 激光束的传播方向就是波矢的方向, 因此两光束的夹角就是波矢失配角, 将上面的结果引入到布里渊放大耦合波方程组中, 得到非共线布里渊放大的数学计算模型

$$\begin{aligned} &\left( \frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \right) E_p \\ &= \frac{g\Gamma}{2} E_s \int_0^t E_p^* E_p \exp(-\Gamma(t-\tau)) d\tau + \frac{1}{2} \alpha E_p, \quad (2a) \\ &\left( \frac{\partial}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) E_s \\ &= \frac{g\Gamma}{2} E_p \int_0^t E_p^* E_s \exp(-\Gamma(t-\tau)) d\tau - \frac{1}{2} \alpha E_s, \quad (2b) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} g &= g_{\text{max}} \frac{(\Gamma/\nu_a)^2}{(\Gamma/\nu_a)^2 + 4 \left[ \frac{4\pi}{\lambda} \left( 1 - \cos \frac{\beta}{2} \right) \right]^2}, \quad (2c) \\ L_{\text{eff}} &= V/S = \begin{cases} \frac{4}{3\pi} \frac{d}{\cos\alpha \sin\alpha}, & (L_m \leq L), \\ (V_1 + V_2 + V_3 + V_4)/S, & (L_m > L), \end{cases} \quad (2d) \end{aligned}$$

其中,  $g_{\text{max}}$  为介质增益系数,  $E_p$  和  $E_s$  分别是抽运光和 Stokes 光的光强.

利用非共线 SBS 放大的数学计算模型, 对非共线强信号布里渊放大进行了数值模拟. 模拟中, 选取 FC-72 为非线性介质, 其增益系数为  $g_{\text{max}} = 6.0 \text{ cm/GW}$ , 介质吸收系数为  $10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ , 介质折射率  $n = 1.25$ . 入射激光脉冲为高斯型, 脉冲宽度为  $10 \text{ ns}$ . 由图 1 可知, 两束光角度的变化将会引起在池中相互重叠区域很大的变化, 从而使介质池中的相互作用长度发生很大变化. 取介质池长为  $20 \text{ cm}$ , 利用(2)式的数学模型进行数值计算, 模拟结果如图 2 所示. 从图中可以看出, 交角变化对介质池长影响很大, 当交角约为  $90 \text{ mrad}$  时, 在池中的有效相互作用长度已经改变为原来池长的一半, 这相当于介质的池长变短了, 而增益系数的变化可以忽略不计. 但是组束的效率仍然可以保持在  $80\%$  以上, 即为了获得较高的组束效率, 要求抽运光和 Stokes 光的交角不能大于  $90 \text{ mrad}$ . 并且, 要求每一级组束时应满足约束条件: 使系统整体增益接近而不超过布里渊阈值  $G_{\text{th}}$ .

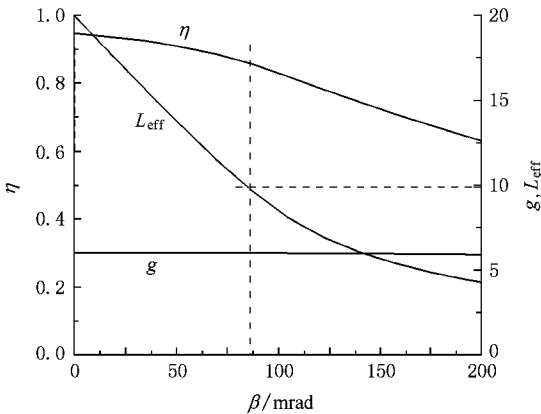


图 2 交角变化对布里渊放大的影响

3. 实验装置

实验装置如图 3 所示, 图中  $M$  代表全反镜, 其中  $M_1$  为透反率为  $1:1$  的分束镜,  $P$  代表偏振片,  $L$  代表聚焦透镜,  $\lambda/2$  和  $\lambda/4$  分别是二分之一波片和

四分之一波片.激光器是种子注入 Nd:YAG 单纵模激光器,输出脉宽约为 8 ns,工作频率 10 Hz.激光器输出的激光经过  $\lambda/2$  和  $P_1$  之后被分成能量比为 1:1 的 p 偏振光和 s 偏振光,p 偏振光经过  $\lambda/2$  和  $P_3$  之后被分成两束光,p 偏振光和 s 偏振光的能量比为 2:1,p 偏振光被  $M_1$  等分为两束光,其中一束被  $M_5$  和  $M_6$  反射至 SBS 放大池作为组束过程的一束抽运光,偏振态为 p 偏振.另一束被注入至 SBS 产生池,用于产生 Stokes 种子光.同理,被偏振片  $P_1$  反射的 s 偏振光被  $P_2$  分为能量比为 2:1 的 p 偏振光和 s 偏振光,s 偏振光被  $M_3$  和  $M_8$  反射至 SBS 放大池,这束光和被  $P_3$ 、 $P_4$ 、 $M_4$ 、 $M_7$  反射的 s 偏振光作为组束过程的两束 s 偏振抽运光.透过  $P_2$  的 p 偏振光被

$M_{10}$ 、 $M_{11}$ 、 $M_2$  和  $M_{12}$  反射至 SBS 放大池作为组束过程的另一束 p 偏振抽运光.在 SBS 产生池中由于电致伸缩效应而产生的 Stokes 种子光相对于入射光有一下频移,并且与入射光是完全相位共轭的,与各个抽运光之间具有很好的相位匹配关系,这使得 Stokes 光在 SBS 放大池中可以被所有抽运光很好地放大.在 SBS 放大池中,s 偏振的 Stokes 种子光首先被两束 s 偏振的抽运光放大,经过镀有高反射膜的镜子  $M_9$  反射,重新返回到 SBS 放大池,在池中被另两束 p 偏振抽运光放大,由于两次经过四分之一波片,此时种子光的偏振态也为 p 偏振,保证了种子光被高效放大.被放大后的种子光透过偏振片  $P_6$ ,耦合输出整个系统.

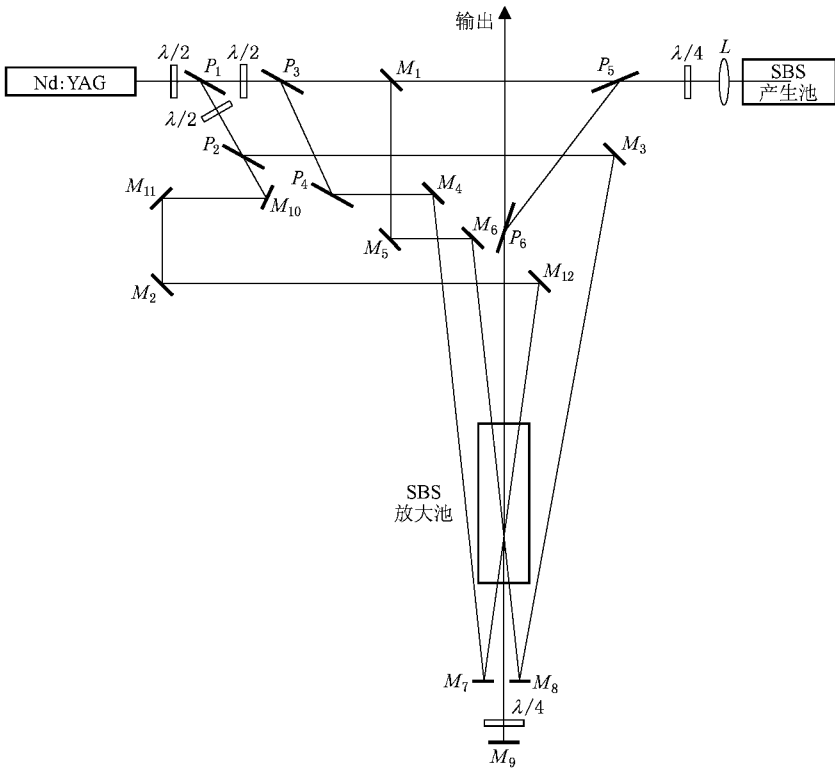


图 3 四束激光组束实验装置图

4. 结果与讨论

为了表征这种结构的组束效果,文中定义组束效率为

$$\eta = E_{SA}/(E_s + E_p) \text{ ,} \tag{3}$$

其中,  $E_{SA}$ 、 $E_s$  和  $E_p$  分别是放大后的 Stokes 能量、Stokes 种子能量和抽运光的能量.

在实验中选择低吸收,高击穿阈值的 FC-72 作为布里渊介质,介质池的长度为 50 cm,通光口径为 7 cm. 根据理论模拟的结果,调节光路使抽运光与 Stokes 光的交叉角度小于 5° (~ 87 mrad). 调整二分之一波片的光轴角度,使四路抽运光的强度基本相等,实验中四束抽运光的最大能量分别为 70.4 mJ, 71.3 mJ, 78.9 mJ, 70.1 mJ, 用于产生 Stokes 种子的抽运光的最大能量为 104.7 mJ, SBS 产生池中最大的

能量反射率为 78% ,利用四束光抽运获得的最终的组束输出能量为 189 mJ. 实验结果如图 4 所示. 当 Stokes 种子光能量和抽运光能量都从小到大变化时 ,组束效率随光束能量的增加而增加 ,这一结果与强信号布里渊放大的规律是一致的 ,即当种子光的强度不断增强 ,甚至超过抽运光时 ,仍能保持高效的布里渊放大<sup>[13]</sup> ,这对于布里渊组束是非常重要的. 但是 ,实验中发现四束抽运光同时抽运获得的组束效率和只有两束抽运光抽运获得的组束效率是不一样的 ,四束抽运光的组束效率要低于两束抽运光的结果. 两束抽运光的组束效率最大可达到 73% ,而四束抽运光的组束效率最大为 65% .这是因为四束抽运光组束时 ,其中两束光所走过的光程要远大于只有两束光组束的光程 ,系统中偏振片、波片、窗片等各光学元件所造成的损耗也远远大于两束光组束的情况. 因此 ,减少组束过程中的光程 ,简化组束结构对于多束激光组束是很重要的.

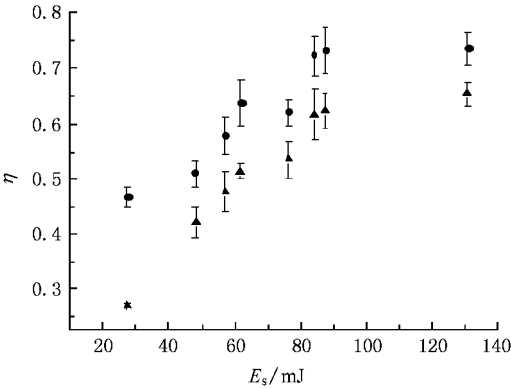


图 4 四束抽运非共线组束效率随 Stokes 光能量的变化(▲ 四束抽运 ,● 两束抽运)

由上面的分析讨论可以看到 ,如果不对组束结构进行特殊的设计 ,即使采用了非共线组束 ,在对多束激光进行组束时 ,组束结构仍显得十分复杂 ,并且 ,系统损耗也越来越大 ,这对实际的应用是很不利

的. 因此 ,我们提出了一种专门针对多束非共线激光组束的结构 ,如图 5 所示. 这种结构通过同时在单个介质池中注入多束抽运光 ,实现多束激光组束 ,一方面可以提高单个介质池中的抽运光能量 ,提高最终输出的 Stokes 种子光的能量 ,另一方面通过这样的结构设计 ,可以在相同束数的激光组束时 ,采用更紧凑 ,更简单的结构. 而且由于可以使多束抽运光与 Stokes 种子光同时进行作用 ,各个抽运光之间所需要的延时也会简化许多. 同样 ,为了获得高组束效率 ,在非共线串行激光组束的每一级也要对应其需要满足的约束条件 :系统整体增益接近而不超过布里渊阈值  $G_{th}$  .

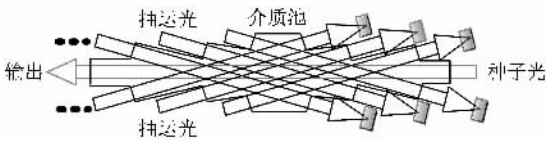


图 5 多束抽运非共线布里渊放大串行组束方案设计

5. 结 论

我们提出了一种新型的非共线激光串行组束结构 ,组束效率是这种结构研究的重要参数 ,从理论上分析了组束效率的影响因素 ,并分析了利用这种结构获得高效组束的可行性 ,结果表明 ,当抽运光和 Stokes 光的交角被限定在 90 mrad 之内时 ,可以获得 80% 以上的组束效率. 根据数值模拟的结果 ,我们设计了四束激光组束的实验方案 ,实现了四束激光的组束 ,得到了能量为 189 mJ 的组束输出 ,并设计了适用于多束激光组束的介质池结构 ,这种结构具有负载高 ,系统损耗低 ,结构简单的优点. 通过对四束激光非共线组束的研究和新型结构的设计 ,为实现重复频率工作大能量激光输出的组束研究提供依据.

[ 1 ] Wang Y L , Li Z W , He W M , Zhang Y 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 883 ( in Chinese ) [ 王雨雷、吕志伟、何伟明、张 祎 2007 物理学报 **56** 883 ]

[ 2 ] Miley G H , Hora H , Osman F , Evans P , Troups P 2005 *Laser Part. Beams* **23** 453

[ 3 ] Thareja R K , Sharma A K 2006 *Laser Part. Beams* **24** 311

[ 4 ] Bo Y , Geng A C , Bi Y , Sun Z P , Yang X D , Li R N , Cui D F , Xu Z Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1171 ( in Chinese ) [ 薄 勇、耿爱丛、毕 勇、孙志培、杨晓东、李瑞宁、崔大复、许祖彦 2006 物理学报 **55** 1171 ]

[ 5 ] Kong H J , Yoon J W , Beak D H , Shin , J S , Lee S K , Lee D W 2007 *Laser Part. Beams* **25** 225

- [ 6 ] Kong H J , Lee S K , Lee D W 2005 *Laser Part . Beams* **23** 55
- [ 7 ] Basov N G , Zubarev L G , Mironov , A B , Mikhailov S I , Kulov A Y 1980 *Sov . Phys . JETP* **52** 847
- [ 8 ] Loree T R , Watkins D E , Johnson T M , Kurnit N A , Fisher R A 1987 *Opt . Lett .* **12** 178
- [ 9 ] Lee S K , Kong H J , Naktsuka M 2005 *Appl . Phys . Lett .* **87** 161109
- [ 10 ] Kong H J , Lee S K , Lee D W 2005 *Laser Part . Beams* **23** 107
- [ 11 ] Wang S Y , Lu Z W , Lin D Y , Ding L , Jiang D B 2007 *Laser Part . Beams* **25** 79
- [ 12 ] 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 ]
- [ 13 ] Ostermeyer M , Kong H J , Kovalev V I , Harrison R G , Fotiadi A A , Megret P , Kalal M , Slezak O , Yoon J W , Shin J S , Beak D H , Lee SK , Lu Z , Wang S , Lin D , Knight J C , Kotova N E , Straber A , Scheikhobeid A , Riesbeck T , Meister S , Eichler H J , Wang Y , He W , Yoshida H , Fujita H , Nakatsuka , M , Hatae T , Park H , Lim C , Omatsu T , Nawata K , Shiba N , Antipov O L , Kuznetsov M S , Zakharov N G 2008 *Laser Part . Beams* **26** 297

## Investigation on a four-beam serial laser combination for a non-collinear scheme based on Brillouin amplification \*

Wang Yu-Lei Lü Zhi-Wei<sup>†</sup> Wang Shuang-Yi Zheng Zhen-Xing He Wei-Ming

( Institute of Opto-electronics , Harbin Institute of Technology , Harbin 150080 , China )

( Received 25 October 2008 ; revised manuscript received 17 November 2008 )

### Abstract

A non-collinear laser beam combination based on Brillouin amplification was proposed. The influence of non-collinear Brillouin amplification on the combination efficiency was analyzed and discussed theoretically. It was shown that the efficiency of 80% can be achieved with the angle between the Stokes and the pump limited in the range of 90 mrad. According to the theoretical results , a four-beam non-collinear combination experiment was designed and carried out. The output energy of 189 mJ at 10 Hz was achieved with the energies of the four pumps being 70.4 , 71.3 , 78.9 and 70.1 mJ , respectively. In order to simplify the scheme and reduce the optical loss , a construction of SBS cell for non-collinear combination of multiple beams was also designed.

**Keywords :** beam combination , stimulated Brillouin scattering , phase conjugation , Brillouin amplification

**PACC :** 4265C , 4265F

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60878005 ) , the National High Technology Development Program of China and Program of Excellent Team in Harbin Institute of Technology.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : zw\_lu@sohu.com