



·激光合束技术·

## 非线性光学激光合束技术研究进展\*

崔 璨<sup>1,2</sup>, 王 月<sup>3</sup>, 王雨雷<sup>1,2</sup>, 白振旭<sup>1,2</sup>, 吕志伟<sup>1,2</sup>

(1. 河北工业大学 先进激光技术研究中心, 天津 300401; 2. 河北省先进激光技术与装备重点实验室, 天津 300401;  
3. 哈尔滨工业大学 航天学院 可调谐(气体)激光技术国家重点实验室, 哈尔滨 150002)

**摘 要:** 回顾了非线性光学激光合束技术的发展历程, 阐述了基于光学相位共轭和基于非线性放大过程的合束思想和基本原理, 梳理了重叠耦合、种子注入和布里渊四波混频增强相位锁定激光合束方式的标志性成果, 总结了等离子体交叉光束能量转移、金刚石拉曼放大和液体布里渊放大激光合束技术的优势和瓶颈。面向高峰值功率、高平均功率、高重复频率激光输出的实现需求, 基于布里渊放大激光合束技术具备系统结构简单、功率负载高且散热效率高的优点, 提出了实现单脉冲能量 100 J、脉冲宽度 10 ns、重复频率 10 Hz 合束激光输出的可行性方案。

**关键词:** 非线性光学; 激光合束技术; 受激布里渊散射; 相位共轭

中图分类号: TN248

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220359

## Research progress on nonlinear optics laser beam combining technology

Cui Can<sup>1,2</sup>, Wang Yue<sup>3</sup>, Wang Yulei<sup>1,2</sup>, Bai Zhenxu<sup>1,2</sup>, Lü Zhiwei<sup>1,2</sup>

(1. Center for Advanced Laser Technology, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Hebei Key Laboratory of Advanced Laser Technology and Equipment, Tianjin 300401, China;

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150002, China)

**Abstract:** The development history of nonlinear optics laser beam combining technology is reviewed. The basic principles and beam combining ideas based on optical phase conjugation and nonlinear amplification process are expounded. The landmark achievements of laser beam combining methods involving the overlapping coupling, the seed injection and the Brillouin four-wave mixing enhanced phase locking are sorted out. The advantages and bottlenecks of plasma cross beam energy transfer, diamond Raman amplification and liquid Brillouin amplification laser beam combining technologies are summarized. Facing the requirements for realizing high peak power, high average power and high repetition rate laser output, based on the advantages of simple system structure, high power load and high heat dissipation efficiency of the Brillouin amplification laser beam combining technology, we proposed a feasible scheme of the combining laser output with pulse energy of 100 J, pulse width of 10 ns, and repetition rate of 10 Hz.

**Key words:** nonlinear optics, laser beam combination technology, stimulated Brillouin scattering, phase conjugation

高功率、高光束质量和高稳定性的固态激光在惯性约束聚变(ICF)<sup>[1-2]</sup>、激光制导<sup>[3-4]</sup>、工业加工<sup>[5-6]</sup>、科学研究<sup>[7-9]</sup>等领域具有重要应用价值。然而, 由于激光活性介质的尺寸有限, 激光输出能量和功率受到限制。同时, 随着激光介质体积的增加, 受泵浦吸收效率的影响, 提高输出功率必将产生大量废热, 限制了光束质量和重复频率的提高。仅仅依靠激光振荡或功率放大技术很难使一个激光系统同时满足高功率、高光束质量和高可靠性的激光输出。激光合束技术是实现激光功率提升的重要途径<sup>[10-12]</sup>, 通过多路激光分布式增益再合束的方式, 能够打破单路激光

\* 收稿日期: 2023-03-02; 修订日期: 2023-03-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(62075056, 61927815); 天津市自然科学基金项目(20JCZDJC00430)

联系方式: 崔 璨, [cancui2021@hebut.edu.cn](mailto:cancui2021@hebut.edu.cn)。

通信作者: 王雨雷, [wyl@hebut.edu.cn](mailto:wyl@hebut.edu.cn)。

功率输出瓶颈。激光相干合束技术在提高激光输出功率的同时,能够保持激光的高光束质量和频谱特性,其关键是控制合束光束之间的相位关系使其产生相干<sup>[13-14]</sup>,根据控制相位原理的不同,相干合束又分为主动反馈控制相干合束<sup>[15]</sup>、腔耦合相干合束<sup>[16-17]</sup>、倏逝波相干合束<sup>[18-19]</sup>、自组织相干合束<sup>[20]</sup>等。

非线性光学激光合束最初作为一种利用非线性光学相位共轭特性实现相位控制的合束技术而被人们所熟知<sup>[21-23]</sup>。目前,激光合束技术领域对非线性光学效应的应用不再局限于相位共轭,基于非线性光学放大过程的激光合束技术,近年来也得到大家的广泛关注。基于受激布里渊散射(SBS)相位共轭特性的合束原理,是由相位共轭镜反演产生的斯托克斯光在补偿波前畸变的同时,通过产生声波场的被动耦合或主动控制获得不同光束之间的相位锁定,从而实现高光束质量的相干合束输出,主要有SBS相位共轭镜(PCM)和布里渊增强四波混频(BEFWM)相位共轭激光合束技术。基于布里渊放大的激光合束技术原理是泵浦光和斯托克斯光均由外部注入并对向传输,当斯托克斯光与泵浦光满足SBS频率匹配条件时,在三波耦合过程中实现泵浦光向斯托克斯光的能量转移,斯托克斯光连续或同时从多束泵浦光中抽取能量,实现激光功率/能量合束。这类合束方法包括基于SBS放大和受激拉曼散射(SRS)放大的合束技术。本文详细阐述了非线性光学相位共轭相干合束技术和非线性光学放大激光合束技术的基本原理、光束合束的主要方案和影响激光合束效率的相关因素;在此基础上,介绍了非线性光学合束技术的发展历程和重要研究成果;总结分析了非线性激光合束技术应用的特点和存在的问题,并针对后续基于非线性放大激光合束技术实现kW级重复频率百焦耳大能量激光输出提出了可行性方案。

## 1 基于光学相位共轭的激光合束技术

### 1.1 SBS 相位共轭相干合束技术

相位共轭可以反转光场的传播方向并补偿波前畸变,共轭光束的产生可以看作三阶非线性效应在介质中的动态全息记录过程,具有这类非常规光学特性的器件被称为非线性相位共轭镜。受激布里渊散射的相位共轭波从噪声中快速增长,相位共轭波在稳态条件下进行分析<sup>[24]</sup>,假设泵浦光场的复振幅是 $E_p$ ,斯托克斯光场的复振幅是 $E_s$ ,写成多模叠加的形式可表示为<sup>[25]</sup>

$$\begin{cases} E_p(\mathbf{r}) = \sum_i a_i(z)A_i(\mathbf{r}) \\ E_s(\mathbf{r}) = \sum_i b_i(z)B_i(\mathbf{r}) \end{cases}, \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

式中: $a_i(z)$ 和 $b_i(z)$ 表示稳态条件下不同模式分量在传播方向上的分布函数; $A_i(\mathbf{r})$ 和 $B_i(\mathbf{r})$ 分别是部分完备正交解系,满足下述微分方程

$$\frac{\partial A_i(\mathbf{r})}{\partial z} + \nabla_T^2 A_i(\mathbf{r}) = 0, \quad \frac{\partial B_i(\mathbf{r})}{\partial z} + \nabla_T^2 B_i(\mathbf{r}) = 0 \quad (2)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} A_i(\mathbf{r})A_j^*(\mathbf{r})dxdy = \delta_{ij}, \quad \int_{-\infty}^{\infty} B_i(\mathbf{r})B_j^*(\mathbf{r})dxdy = \delta_{ij} \quad (3)$$

式中: $\nabla_T = (\partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2)$ ,  $\delta_{ij}$ 是积分常数。那么根据稳态SBS三波耦合的声波场方程可以得到

$$\begin{cases} \sum_i A_i(\mathbf{r}) \frac{\partial a_i(z)}{\partial z} = -\frac{g_B}{2} \Gamma_B \sum_{jkl} b_j^*(z)B_j^*(\mathbf{r})b_k(z)B_k(\mathbf{r})a_l(z)A_l(\mathbf{r}) \\ \sum_i B_i(\mathbf{r}) \frac{\partial b_i(z)}{\partial z} = -\frac{g_B}{2} \Gamma_B \sum_{jkl} a_j^*(z)A_j^*(\mathbf{r})a_k(z)A_k(\mathbf{r})b_l(z)B_l(\mathbf{r}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\Gamma_B$ 为布里渊介质的增益线宽, $g_B$ 为布里渊介质的增益系数, $j, k, l = 1, 2, 3 \dots$ 。公式(4)方程组两边分别乘以正交解系复共轭( $A_n^*, B_n^*$ ),其中 $n = 0, 1, 2, 3 \dots$ ,然后全空间域积分,可以得到

$$\begin{cases} \frac{\partial a_n(z)}{\partial z} = -\frac{g_B}{2} \Gamma_B \sum_{jkl} b_j^*(z)b_k(z)a_l(z) \int_{-\infty}^{\infty} B_j^*(\mathbf{r})B_k(\mathbf{r})A_l(\mathbf{r})A_n^*(\mathbf{r})dxdy \\ \frac{\partial b_n(z)}{\partial z} = -\frac{g_B}{2} \Gamma_B \sum_{jkl} a_j^*(z)a_k(z)b_l(z) \int_{-\infty}^{\infty} A_j^*(\mathbf{r})A_k(\mathbf{r})B_l(\mathbf{r})B_n^*(\mathbf{r})dxdy \end{cases} \quad (5)$$

从上述方程就可以看出,满足泵浦光重叠积分最大的必要非充分条件是 $E_p(\mathbf{r}) = a_0(z)A_0(\mathbf{r})$ ,且 $A_0(\mathbf{r}) = B_0^*(\mathbf{r})$ ,那么把公式(4)代入公式(5),可以得到

$$\frac{\partial b_n(z)}{\partial z} = -|a_0(z)|^2 \sum_l b_l(z) g_{ln}(z) \quad (6)$$

式中： $g_{ln}(z)$ 表征不同模式成分耦合增益大小，可表示为

$$g_{ln}(z) = -\frac{g_B}{2} \Gamma_B \int_{-\infty}^{\infty} |B_0(\mathbf{r})|^2 B_l(\mathbf{r}) B_n^*(\mathbf{r}) d\mathbf{r} \quad (7)$$

从公式(7)可以看出，当 $B_n$ 和 $B_l$ 均为 $B_0$ 时， $g_{ln}(z)$ 取得最大值，并且远远高出其他模式分量的增益。因此在增益竞争过程中，相位共轭成分信号呈指数趋势上升，在这种条件下可以获得近乎完美的相位共轭输出，即

$$E_S(\mathbf{r}) = \sum_i b_i(z) B_i(\mathbf{r}) \propto b_0(z) B_0(\mathbf{r}) \propto E_P^*(\mathbf{r}) \quad (8)$$

在 SBS 饱和条件下，尽管公式(5)在不同模式条件下重叠积分差异会减小，从而非相位共轭成分从噪声中产生放大，但理论数值分析表明，当泵浦光为高斯光束时，在 SBS 聚焦结构下产生的斯托克斯光，其 95% 的成分是相位共轭的<sup>[25-26]</sup>，这表明 SBS 相位共轭镜可以实际应用且是十分有效的。在传统的 SBS-PCM 结构中，由于单一泵浦光入射到 SBS 介质，斯托克斯光是由噪声起源并放大产生的，因此其相位没有绝对的时间参考。如果两束斯托克斯光分别产生于两个完全独立的 SBS-PCM，那么，两束斯托克斯光之间将存在任意相差且与泵浦光相位无关。为了控制斯托克斯光之间的任意相差，就必须建立斯托克斯光相位间的绝对时间参考系。针对这一问题，研究人员提出了重叠耦合相位锁定和后向种子注入相位锁定两种相位控制方法，其基本原理如图 1 所示。

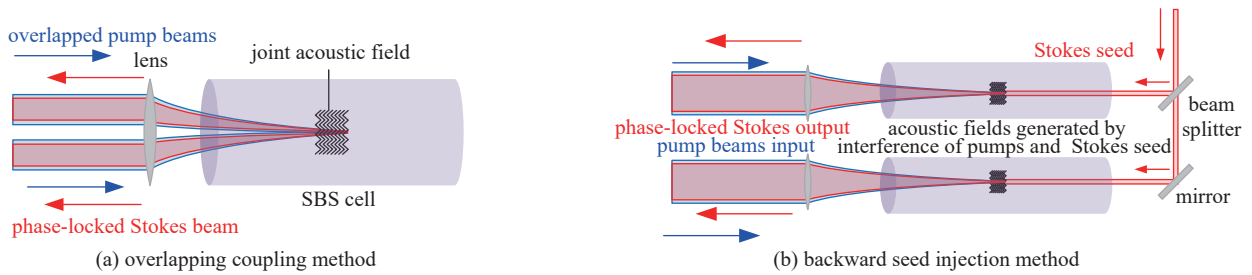


Fig. 1 Two kinds of SBS-PCM phase-locking laser beam combining methods

图 1 两种基于 SBS-PCM 相位锁定的激光合束方式

在重叠耦合法中，多束入射光交叉在 SBS 池的相互作用区，在这种情况下所有光束经同一声场衍射，两束光之间建立起固定的相位关系，斯托克斯光束之间相位延迟为零，从而实现相位锁定。前苏联科学院列别杰夫物理研究所 N. G. Basov 等人于 1978 年，利用双折射晶体分光，将两束泵浦光注入到  $\text{CS}_2$  介质中重叠耦合，如图 2 所示，实现了两束垂直偏振泵浦光的相干合束<sup>[27]</sup>。为了获得衍射极限的合束激光输出，他们将两束泵浦光偏振调整一致，将光束延时控制在光束在介质池内必能相干的范围内<sup>[28]</sup>。该课题组于 1981 年实现了 9 路激光注入到同一介质池的相位锁定，相位锁定后，能量反射率提高 10%~15%，输出近场的光束轮廓更加清晰<sup>[29]</sup>。1994 年，美国休斯研究实验室利用重叠耦合相位锁定技术实现了 8 路激光相干合束，1.25 Hz 工作频率下，基频输出 8.2 J，二倍频输出 4.4 J，脉冲宽度 15 ns，近场分布为八个独立的相位共轭光束，远场分布约 2.5 倍衍射极限<sup>[30]</sup>。

在后向种子注入法中，把一束与入射光方向相反的种子光注入到被合束的入射光束相互作用区，种子光束的功率远低于 SBS 泵浦光的峰值功率，但也远高于郎之万噪声的自发辐射信号，因此只要控制种子光束的相位就可以控制斯托克斯输出光束的相位。韩国先进科学技术学院的 H. J. Kong 等人对后向种子注入锁相技术进行了研究和改进<sup>[32-35]</sup>，通过控制斯托克斯波在介质中产生的位置和时间来控制不同介质池中的相位同步性。2005 年，该课题组报道了采用折返池结构实现后向种子注入，通过自激发的密度调制控制斯托克斯相位，实现了在 10 Hz 的工作频率下，96% 的激光脉冲相位差不超过 1/4 波长的实验结果<sup>[36]</sup>。2008 年，该课题组将折返池结构与 PZT 反馈控制系统结合，实现了相位锁定的主动动态控制，同时避免了介质池同一位置热量的过度积累，系统获得了长时

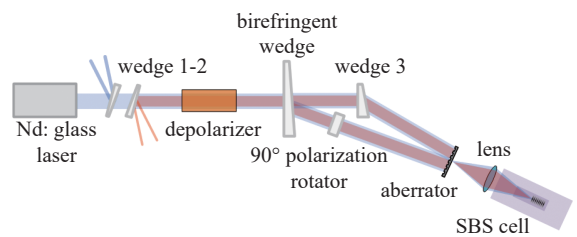


Fig. 2 N.G. Basov coherent beam combining of two vertically polarized pump beams<sup>[31]</sup>

图 2 N.G. Basov 两束垂直偏振泵浦光的相干合束示意图<sup>[31]</sup>

间内的相位锁定稳定,在 10 Hz 的工作频率下,相位波动标准差小于 1/51 波长的实验结果<sup>[37]</sup>。2010 年, H. J. Kong 等人实验完成了基于 PZT 主动控制的四路分波前 SBS-PCM 相干合束,获得 (169±6) mJ 的单脉冲能量输出<sup>[38]</sup>。2013 年,他们以光纤种子注入结构的半导体激光器为基础,通过分振幅的方式,完成了 4 束光相干合束,获得单脉冲能量 0.4 J、脉冲宽度 10 ns、重复频率 10 kHz、平均功率 4 kW 的相干合束输出,建立了 Kumgang 激光系统<sup>[39]</sup>,实验光路如图 3 所示。

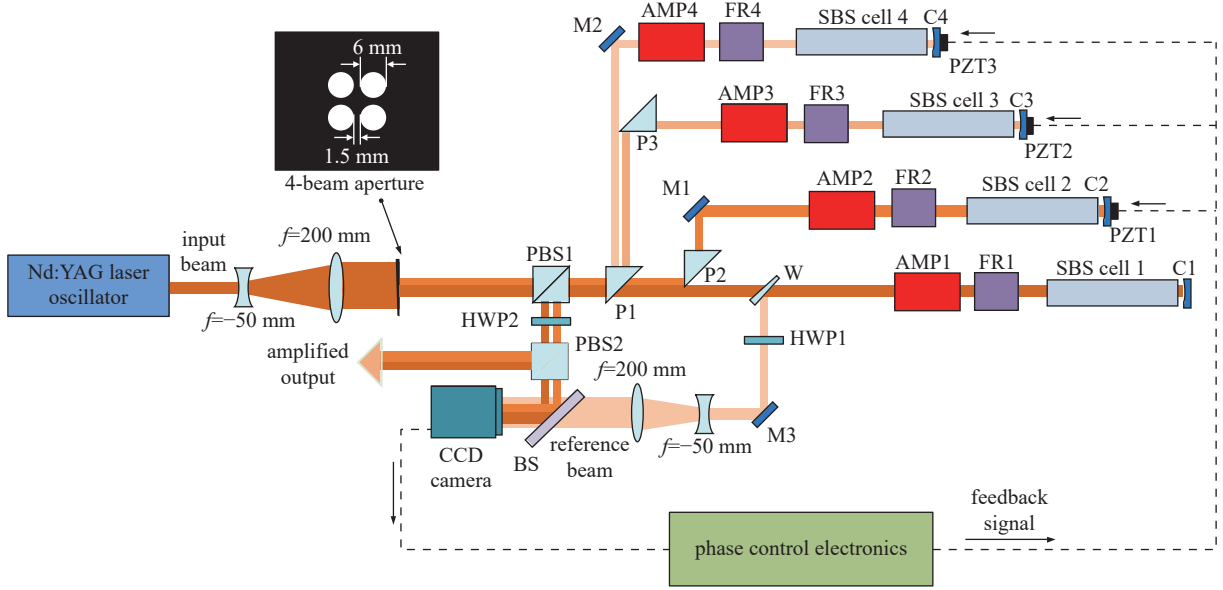


Fig. 3 Diagram of Kumgang-4 kW coherent beam combining laser system<sup>[39]</sup>  
图 3 Kumgang-4 kW 相干合束激光系统光路图<sup>[39]</sup>

### 1.2 布里渊增强四波混频相位共轭相干合束技术

布里渊增强四波混频过程如图 4 所示。 $E_1$ 和 $E_2$ 是相互共轭且偏振相同的两束背向传输光场, $E_1$ 的频率为 $\omega_0$ , $E_2$ 的频率为 $\omega_0 - \Omega_B$ ,其中 $\Omega_B$ 是非线性介质的布里渊频移,那么两束光在布里渊介质内发生拍频驱动声子光栅。与 $E_1$ 同频的泵浦光 $E_P$ 经光栅衍射,产生共轭光 $E_S$ 与 $E_2$ 之间相位锁定。通过该过程,其他入射光只要经过光场 $E_1$ 和 $E_2$ 的交叠区域就可以实现其相位共轭光与 $E_2$ 之间相位锁定,故不需要所有光束之间相互重叠,因此布里渊增强四波混频相较于重叠耦合相位锁定方案,锁相稳定性显著提高。图 4 中给出了光场与声波场的动量匹配关系,声波场矢大小为 $|k_B| = 2\pi/\Lambda_B$ , $\Lambda_B$ 为声波场的空间周期, $L$ 为空间相互作用长度。

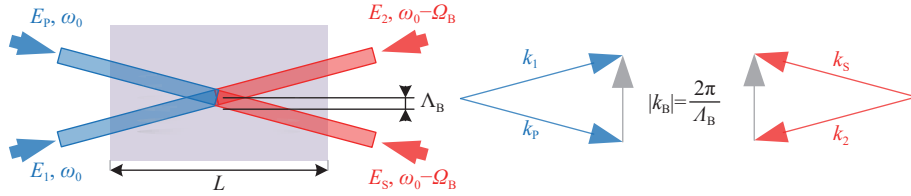


Fig. 4 Diagram of Brillouin enhanced four-wave mixing principle<sup>[40]</sup>  
图 4 布里渊增强四波混频原理示意图<sup>[40]</sup>

布里渊增强四波混频还是矢量相位共轭过程,通过光束偏振态的调整实现相位锁定,沿用图 4 中物理量符号的矢量形式,布里渊增强四波混频可以由公式(9)~(12)描述<sup>[31]</sup>

$$\frac{dE_1}{dz} = \frac{-g_B c}{4\pi} [(E_1 \cdot E_2^*)E_2 + (E_1 \cdot E_S^*)E_S + (E_2^* \cdot E_P)E_S] \quad (9)$$

$$\frac{dE_2}{dz} = \frac{-g_B c}{4\pi} [(E_1^* \cdot E_2)E_2 + (E_1 \cdot E_S^*)E_P + (E_P^* \cdot E_2)E_P] \quad (10)$$

$$\frac{dE_P}{dz} = \frac{-g_B c}{4\pi} [E_2(E_1 \cdot E_S^*) + (E_2^* \cdot E_P)E_2 + (E_P \cdot E_S^*)E_S] \quad (11)$$

$$\frac{dE_S}{dz} = \frac{-g_B c}{4\pi} [(E_1^* \cdot E_S)E_1 + E_1(E_2 \cdot E_S^*) + (E_P^* \cdot E_S)E_P] \quad (12)$$



式中： $c$ 为真空中的光速。我们知道，光场的偏振方向在垂直于传播方向的 $xOy$ 平面上沿坐标轴进行分解

$$\mathbf{E}_m = |E_{mx}| \exp(i\phi_{mx}) \mathbf{e}_x + E_{my} \exp(i\phi_{my}) \mathbf{e}_y, \quad m = 1, 2, P, S \quad (13)$$

式中： $E_{mx}$ 和 $E_{my}$ 分别表示复振幅 $E_m(\mathbf{r})$ 在 $x$ 和 $y$ 方向上的分量， $\mathbf{e}_x$ 和 $\mathbf{e}_y$ 分别表示 $x$ 和 $y$ 轴的方向向量， $\phi_{mx}$ 和 $\phi_{my}$ 分别表示偏振方向上的初始相位。由于方程中布里渊介质的增益系数 $g_B$ 是实数，且初始条件 $\mathbf{E}_S = 0$ ，那么介质中光场 $E_1$ 和 $E_P$ 之间的光程差 $\Delta L$ ，泵浦光 $E_P$ 和斯托克斯光 $E_S$ 偏振分量之间的相位差，决定了系统相位差

$$\Delta\phi = \frac{\Omega_B \Delta L}{c} + \phi_{Sx} - \phi_{Sy} + \phi_{Px} - \phi_{Py} \quad (14)$$

从公式(14)可以看出，通过改变光束之间的光程差、光束偏振椭圆度，以及布里渊共振频率 $\Omega_B$ ，即可实现光束之间的相位匹配。基于布里渊增强四波混频锁相实现的是绝对相位锁定，更适用于获取多光束相干合束的激光输出。

关于布里渊增强四波混频锁定相位 M. W. Bowers 和 R. W. Boyd 进行了论述<sup>[31,41]</sup>。实验上他们通过布里渊增强四波混频技术，实现了退偏造成的损耗从总输出能量的 50%降低到小于 2%<sup>[31]</sup>，并进行了两个双池结构实验及一个单池结构实验，对每个系统的许多特性，如近场及远场分布、反射率、时间波形等参数进行了测量，发现高功率激光应用中单池结构与前两者的双池结构相比效果相近或者效果更好，并给出了如图 5 所示的单池实验光路，证明了对于一个适当设计的布里渊增强四波混频相位共轭系统，可以精确地控制几个共轭光束的相位关系，并得到较好的合束效果。

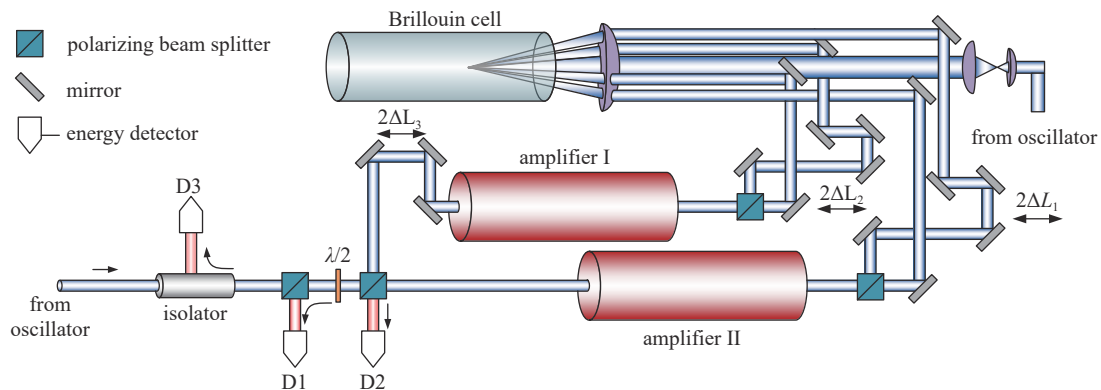


Fig. 5 Brillouin-enhanced four-wave mixing phase-conjugating system<sup>[31]</sup>

图 5 布里渊增强四波混频相位共轭系统<sup>[31]</sup>

1997 年，美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 的 M. W. Bowers 等人利用布里渊增强四波混频相位共轭镜实现了四路泵浦光的相干合束输出<sup>[31]</sup>，该方法可以同时补偿波前畸变和光学退偏效应，光程差控制范围扩大至 1 cm 左右，获得了 5 J、10 Hz、10 ns 的合束激光，远场分布约为 1.5 倍衍射极限。同年，LLNL 实验室的 C. B. Dane 和 L. A. Hackel 利用 SBS-PCM 实现了四束高能量重复频率的激光合束；四路泵浦光单束能量 25 J，脉冲宽度 500 ns，合束后单脉冲能量 100 J，重复频率 10 Hz，合束光束的近场与远场分布如图 6 所示<sup>[42]</sup>。日本大阪大学激光工程研究所

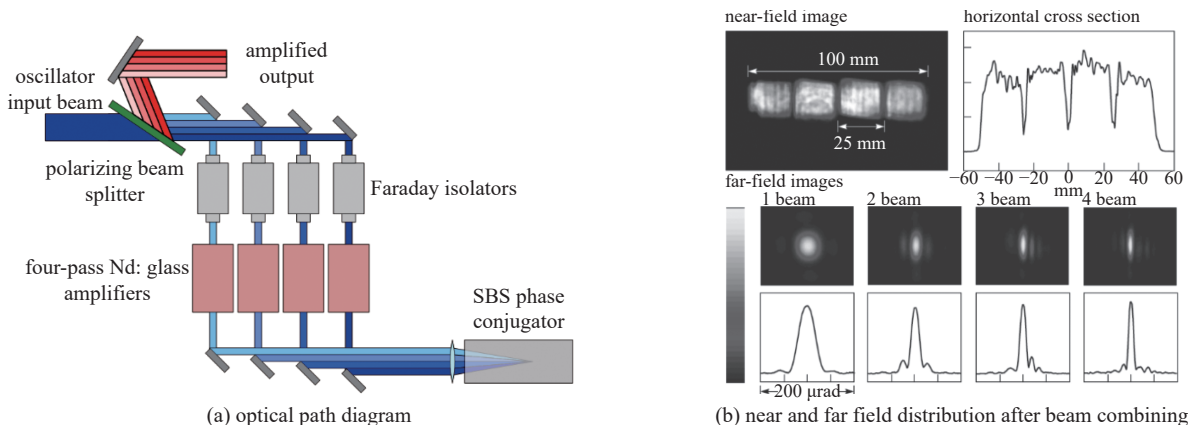


Fig. 6 Schematic diagram of the four-beam optical coherent beam path with output near- and far- field distribution measurements at LLNL, USA<sup>[42]</sup>

图 6 美国利弗莫尔实验室四路光相干合束光路示意图与输出近远场分布测量结果<sup>[42]</sup>

H. Yoshida 等人,于 2004 年采用不同的 SBS 介质对两束泵浦光进行相干合束,获得单脉冲能量 7.36 J,脉冲宽度 50 ns,重复频率 50 Hz 的合束激光输出<sup>[43]</sup>。两路泵浦光分别入射至 FC-72 和 FC-75 介质池中产生斯托克斯光,相位锁定的同时进行热效应补偿;由于两束斯托克斯的频移不同,有效防止了两束光在时间上拍频、在空间上干涉,从而获得了稳定的波形和横向分布。

## 2 基于非线性光学放大激光合束技术

基于非线性放大效应的激光合束技术包括基于 SBS 放大的激光合束技术和基于 SRS 放大的激光合束技术。该类技术的能量转移机制,一般是泵浦光经过声波场、分子振转乃至离子波形成的密度“光栅”,产生布拉格衍射,从而能量向斯托克斯转移形成非线性放大的表征。基于非线性放大效应的激光合束输出,可以同时具有良好的近场与远场光束质量,获得真正物理意义上的单束激光输出。

### 2.1 基于等离子体内交叉光束能量转移的激光合束技术

在美国国家点火装置(NIF)中,192束激光从各个方向聚焦入射聚变靶丸,不可避免地在入口处出现光束交叠。为了减少光束干涉引起激光成丝和其他不稳定因素,每束激光通过调制形成四个分立频谱线,最低频率和最高频率之差 $\Delta\omega$ 是原入射光中心频率的 $10^{-3}$ 倍。当两束光以交叉角度 $\theta$ 交叠,靶丸内产生等离子波的波矢为 $k_L$ ,当满足条件 $|k_L| = 2|k_0|\sin(\theta/2)$ 时,两束或多束重叠激光束之间就会发生能量交换,该过程称为交叉光束能量转移(CBET),其中 $k_0$ 为入射光束波矢。激光束之间的能量交换严重影响了靶丸激活要求的系统能量时间对称性,从而影响惯性约束聚变的能量输出。为了抑制CBET产生并根据能量流动规律优化入射结构,科学家们深入研究了等离子体内的 Raman 放大过程和 Brillouin 放大过程及其影响因素。理论模型示意如图 7 所示<sup>[44]</sup>,泵浦光入射等离子体引起电子/离子密度扰动,在微观上体现为电子/离子的横向运动,并通过等离子体的电子/离子波与种子光发生三波耦合,实现泵浦光向信号光的能量转移<sup>[45]</sup>。对于基于 SRS 放大的能量转移过程,美国普林斯顿大学的 Malkin 等人进行了深入研究,理论计算表明,SRS 允许激光在成丝等不稳定的过程中完成泵浦光向种子光的能量转移,并提出了非线性泵浦耗尽机制下,等离子体后向拉曼散射放大(BRA)技术<sup>[46]</sup>。虽然理论上该过程的能量转移效率高达 90%,但是在实验中,由于等离子体破波、朗道阻尼、离子俘获等对 BRA 的影响,在激光强度达到 $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>时,能量转移效率从未超过 10%,远远低于预期理论。

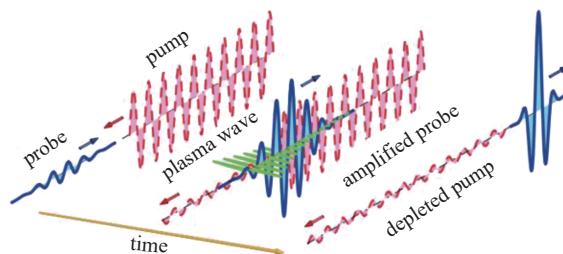


Fig. 7 Schematic diagram of Raman amplification process in plasma<sup>[45]</sup>

图 7 等离子体内 Raman 放大过程示意图<sup>[45]</sup>

美国 LLNL 实验室对等离子体内能量交叉转移有更大贡献的 SRS 过程进行了研究,等离子体内 SRS 能量转移过程发生在泵浦光与种子光频率匹配<sup>[47-50]</sup>以及流动等离子体内等频率光束交叠<sup>[47-48, 51-54]</sup>的条件下,频率差过大或过小、以及等离子体流速和密度波动频率都会对能量转移效率产生影响<sup>[50]</sup>。等离子体内的 SRS 放大过程与 SRS 放大过程很类似,唯一的区别就是 Langmuir 波由低频离子-声波场代替。离子-声波场是通过泵浦光与种子光拍频驱动的,因此泵浦光和种子光具有非常接近的光频率。

美国 LLNL 对入射等离子体内具有特定频率差的两光束之间能量转移效率进行了研究,实现了 52% 效率的能量转移;并验证了流动等离子体中等频率对向非共线传输光束能量交换的存在<sup>[49-50, 55]</sup>。2017 年,LLNL 的 R. K. Kirkwood 等人联合罗彻斯特大学,基于美国国家点火装置(NIF),首次实现了等离子体中的多光束合束实验,其采用频率匹配的能量转移方案,合束示意图如图 8(a)所示。8 束泵浦光与单束斯托克斯光同向传输,斯托克斯光在预先激发的等离子体中与泵浦光束体积重叠,产生前向 SBS 放大,实现泵浦光能量向斯托克斯光的转移。作为共振介质的等离子体,是由 40 路 NIF 激光束预热 C<sub>5</sub>H<sub>12</sub> 气球,在直径为 2 mm、长度为 7 mm 的圆柱范围内形成初始浓度的等离子体,其初始浓度是 351 nm 激光产生前向 SBS 临界浓度的 2.5%。偏振相同的八路激光被分为两组:一组泵浦光以 $14.7^\circ \pm 3.1^\circ$ 的交叉角度与种子光交叠,与种子光的波长差为 0.1 nm,另一组泵浦光以 $20.7^\circ \pm 2.4^\circ$ 的交角与种子光交叠,波长差为 0.12 nm,以保证泵浦光与种子光的共振效果,最终获得了 4 kJ/1 ns 的单脉冲输出,高于任何目前所能输出的单束能量,能量转换效率为 45%<sup>[56]</sup>,输出通量测试结果如图 8(b)所示。在该实验的基础上,2018 年他们发表了 61 束激光非共线前向 SBS 放大合束设计方案,以实现更高能量单束激光输出<sup>[57]</sup>。

2022 年,美国 LLNL 报道了 21 束的等离子体合束结果<sup>[58-59]</sup>,如图 9(a)所示。同样在 40 束非共振激光作用下产

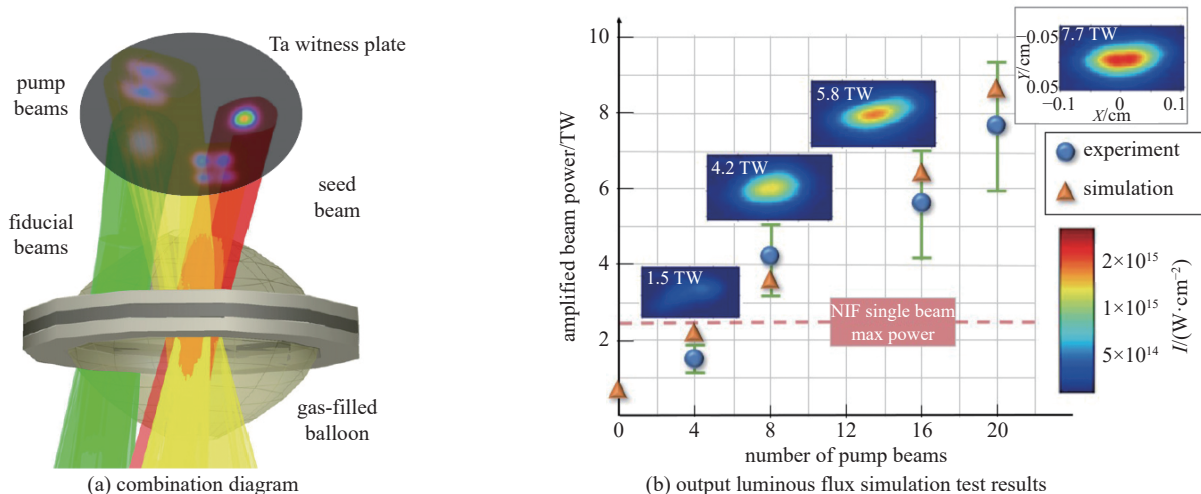


Fig. 8 Eight-beam laser beam combining in plasma experiment at LLNL, USA<sup>[56]</sup>

图 8 美国利弗莫尔实验室等离子体八束激光合束实验<sup>[56]</sup>

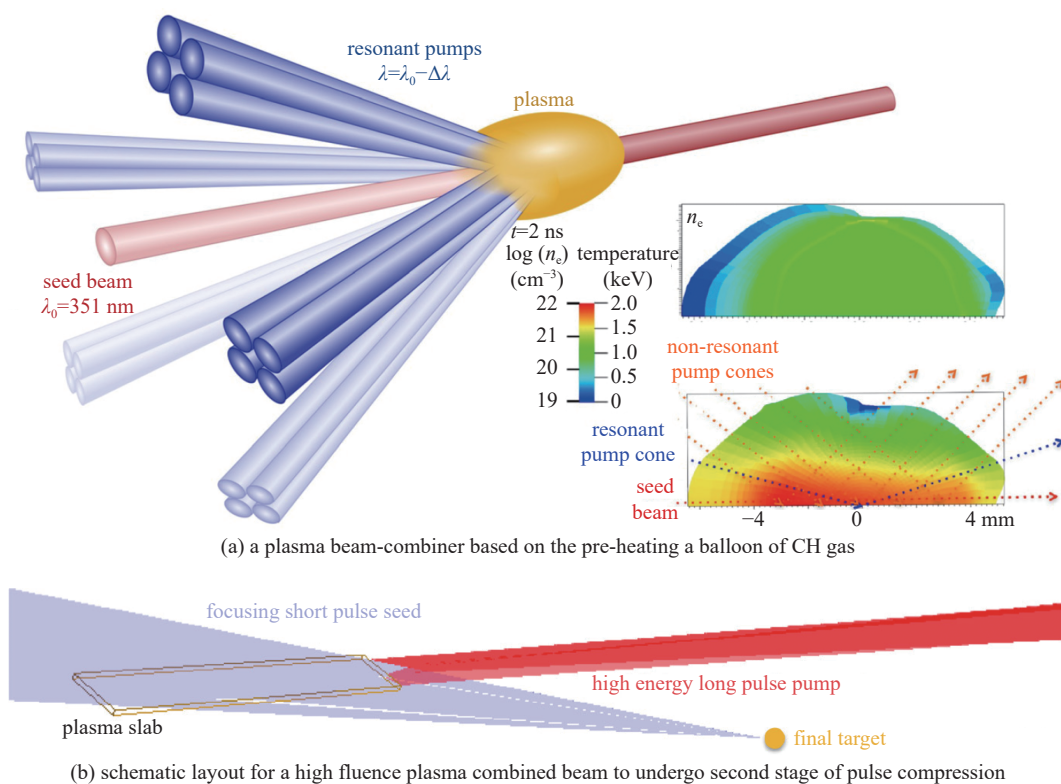


Fig. 9 Schematic diagram of the 21 cross beam energy transfer experiment by R. K. Kirkwood et al<sup>[58]</sup>

图 9 R. K. Kirkwood 等人<sup>[58]</sup>21 路交叉能量转移实验示意图

生合适条件的等离子体，20 束共振泵浦光与斯托克斯光在等离子体合束器实现了 7.7 kJ/1 ns 的输出。后期，他们设计了高能量和功率的等离子体光学器件，以实现第二阶段的脉冲压缩，如图 9(b) 所示，其中  $\lambda_0$  表示斯托克斯光的中心波长， $\lambda = \lambda_0 - \Delta\lambda$  表示共振泵浦波长。经过这样的研究，研究人员深刻认识到等离子体介质由于无光致损伤阈值、高储能密度等特点，可以作为超高功率激光的脉冲放大或脉冲合束器件。单束激光不再受限于固体光学元件的损伤阈值，利用三波耦合作用机制，将多束激光合并成一束激光输出，从而提升单束激光输出能力。

截至 2022 年底，国际上仅美国 LLNL 报道了 CBET 激光合束打靶技术的实验研究结果，其他国家尚未开展相关的实验研究工作。2018 年，复旦大学、中国工程物理研究院和上海交通大学报道了基于等离子体强耦合布里渊散射的同频双光束之间的能量转移<sup>[60]</sup>，种子光实现了 6 倍的功率增益。2022 年，中国科学与技术大学和上海交通大学建立了惯性约束聚变 (ICF) 和等离子体光学中的非线性光束耦合 CBET 过程的动力学模型<sup>[61]</sup>，提出了任意高阶辛几何算法的数值求解方法，开发 BEAM 代码为更多非线性光学相互作用提供精确的理论评估。2023 年 2 月，



中国工程物理研究院激光聚变研究中心激光技术研究团队报道了令人振奋的成果<sup>[62]</sup>, 团队通过重构前端系统构架、抑制多色激光工作下的幅频效应、改进主放光栅下的增益模型、对三倍频晶体匹配角进行波长跟随, 在高功率固体激光装置上完成了 CBET 技术所需的四色激光输出能力的构建。实验光路如图 10 所示, 激光波长分四环分布, 每环独立可调, 环内同色; 内环两色, 中心波长覆盖 1053.0~1053.5 nm; 外环亮色, 中心波长覆盖 1052.5~1053.0 nm; 测试数据表明, 通过 CBET 将外环光能量向内环光能量转移的效果明显。

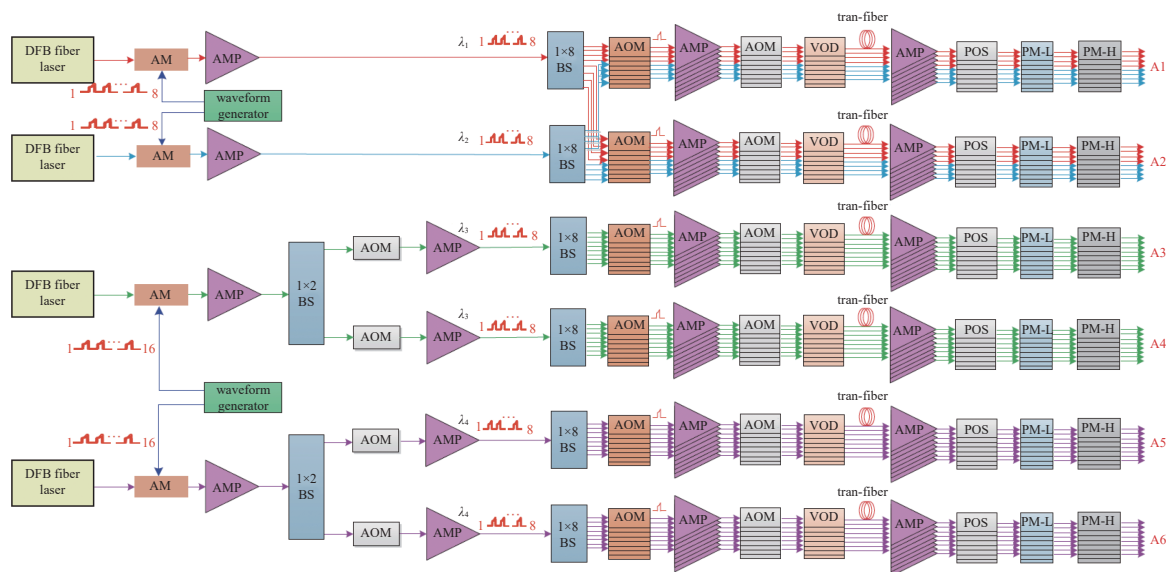


Fig. 10 Four-color front-end system optical path diagram<sup>[62]</sup>

图 10 四色前端系统光路示意图<sup>[62]</sup>

## 2.2 基于金刚石拉曼放大的激光合束技术

金刚石晶体所具有的优异光热特性以及非线性特性使得其在高功率激光器方向得到了足够的重视以及快速的发展<sup>[63]</sup>。2014 年, 澳大利亚麦考瑞大学的 R. P. Mildren 等人对金刚石拉曼放大器进行了研究, 利用非共线泵浦结构对三束泵浦光能量进行抽取, 非共线结构中的拉曼增益是共线增益的 0.46 倍, 单束光与三束光对斯托克斯光拉曼增益基本相同<sup>[64]</sup>。2015 年, 该课题组研究了强聚焦结构下的拉曼放大器增益, 通过改变泵浦光聚焦透镜的焦距, 研究了同一束泵浦光对斯托克斯光的单程小信号增益, 在强聚焦结构下, 小信号增益从 4.6 提高至 5.8<sup>[65]</sup>。2017 年, 该课题组再次实验研究了三束金刚石拉曼放大器合束过程, 并从理论上给出了合束过程从三束激光向多束激光扩展的可能。随着泵浦束数的增加, 泵浦光与斯托克斯光之间的夹角变大, 拉曼增益降低, 而通过优化泵浦光的横场排布, 拉曼增益在 7 束泵浦光的非共线结构下出现极值峰; 研究结果给出了金刚石介质热管理的相关理论规律。最终基于金刚石拉曼放大器的三束激光合束获得了波长 1240 nm, 单脉冲宽度 6 ns, 重复频率 1 kHz, 单脉冲能量 0.5 nJ, 峰值功率 5.2 kW 的合束激光输出, 光路示意图及远场光束质量如图 11 所示<sup>[66]</sup>。

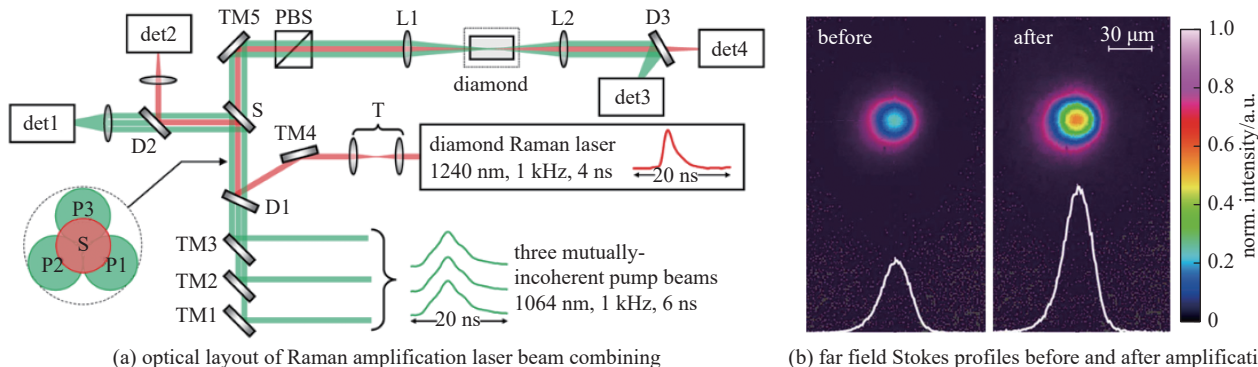


Fig. 11 Raman amplification-based diamond laser beam combining at Macquarie University, Australia<sup>[66]</sup>

图 11 澳大利亚麦考瑞大学基于拉曼放大的金刚石激光合束<sup>[66]</sup>

## 2.3 基于重氟碳介质 SBS 放大激光合束技术

基于对受激布里渊散射及非线性放大的大量研究结果, 吕志伟等人提出了基于重氟碳液体介质的 SBS 放大串



行激光合束技术<sup>[67]</sup>。在高增益的布里渊液体介质中,泵浦光与具有特定布里渊频移的斯托克斯光对向传输,介质在强光场作用下电致伸缩形成声子光栅,光场与声波场耦合,实现泵浦光能量向斯托克斯光转移,获得大能量单脉冲输出。与其他介质中的SBS放大过程和相位共轭的相干合束结构相比,SBS串行放大结构不需要聚焦泵浦光束,从而有效提高了激光系统的整体负载,更容易实现相对较大能量、高峰值功率的激光输出。

2010年,该团队进行了强信号斯托克斯布里渊放大实验,研究结果表明,当斯托克斯光与泵浦光光强比值为39.5/1时,斯托克斯光依然可以从低功率密度泵浦光中抽取能量,抽取效率达到了85%,没有出现能量逆流现象,验证了基于SBS放大合束的可行性<sup>[68-69]</sup>,并设计了非共线结构的串行合束方案<sup>[70-71]</sup>。在非共线多光束激光合束中,斯托克斯光与泵浦光呈一定夹角相向传输,与多束泵浦光在空间上同时交叠,实现能量抽取。针对非共线SBS放大过程的增益特性,理论上得到了非共线的稳态小信号增益表达式,通过等效非共线过程模拟了能量转化过程<sup>[72]</sup>。针对非共线增益降低的问题,利用SBS增益谱提出了斯托克斯光与泵浦光频移再匹配的方案,解决了由于频率失谐导致的增益系数下降问题;结果表明在相互作用长度几乎不变的前提下,斯托克斯光与泵浦光夹角大于45°时,理论上仍可实现高于80%的能量提取效率<sup>[73]</sup>。2018年,他们实现了主动频率补偿下的百皮秒非共线SBS放大。前端利用Mach-Zehnder调幅器产生了200 ps脉冲和5 ns方波脉冲,200 ps脉冲在频移后与方波脉冲耦合叠加,偏移量使非共线SBS过程的频率相匹配,最后在光路中以2°夹角进行了非共线SBS放大,实验方案如图12所示,该过程能量抽取效率接近60%,在大型激光装置上验证了重氟碳等液体介质的高负载特性<sup>[74-75]</sup>。2021年,该研究团队实现了8束泵浦光与一束斯托克斯光的非共线SBS放大激光合束,最终获得了5.7 J/10 ns/10 Hz的输出结果,合束效率达到67%<sup>[76-77]</sup>。

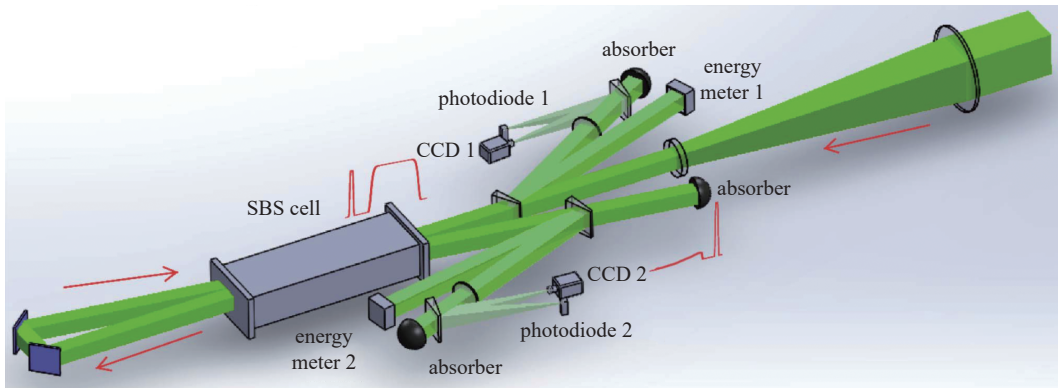


Fig. 12 Schematic diagram of the non-collinear SBS amplification process of hundreds-picosecond pulse with active frequency compensation<sup>[75]</sup>

图 12 主动频率补偿的非共线SBS百皮秒脉冲放大光路示意图<sup>[75]</sup>

#### 2.4 非线性光学激光合束技术实现“三高”激光输出

2021年,中国工程物理研究院提出强激光装置发展的未来趋势,其基本特点是高峰值功率、高平均功率、高重复频率,简称“三高激光”<sup>[78]</sup>。“三高激光”在激光聚变能、太空激光、核材料处理等领域具有重大应用前景,是强激光技术与工程亟待开发的新领域。目前,英国卢瑟福实验室采用新型介质材料Yb:YAG,片状激光晶体结构,超低温高速气冷和高功率半导体激光阵列泵浦的MOPA技术外<sup>[79-81]</sup>,首次实现了单脉冲能量100 J/脉冲宽度10 ns/重复频率10 Hz的“三高”指标。基于非线性光学的激光合束技术,因其能够规避大尺寸介质晶体热效应,降低系统的建设难度和维护成本,为重复频率百焦耳乃至更大能量的激光脉冲输出提供了新的技术途径。韩国先进科学技术学院试图利用基于SBS-PCM激光合束技术实现上述指标的激光输出<sup>[82]</sup>,但最终牺牲脉冲峰值功率的代价,于2013年实现0.4 J、10 ns、10 kHz-4 kW合束激光输出<sup>[39]</sup>。这是因为对于总能量超过100 J、脉宽仅10 ns的待合束激光,利用被动重叠耦合锁相或BEFWM锁相时,交叠区局部功率密度将远超固态、液态、气态介质的损伤阈值,并破坏相位锁定,无法完成多路激光合成;后向种子注入的主动锁相的SBS-PCM合束结构,可以有效分散负载,但每一路的主动反馈相位控制系统复杂,工程上阻碍了系统的扩展。虽然等离子体光学合束器可以负载超高峰值功率,但创造等离子体合束所需的高强度物理场环境,本身就需要极大脉冲能量和超高峰值功率激光,因此基于等离子体CBET的激光合束技术难以实现重复频率大于10 Hz的要求;基于固体介质的非线性放大激光合束,受限于介质负载低,极易发生损伤,无法达到百焦耳能量的激光输出。

基于液体介质的SBS放大激光合束技术,无需采用聚焦结构,液体介质的损伤阈值可以达到100 GW/cm<sup>2</sup>,对

基频光的吸收系数小<sup>[83]</sup>, 介质内无热沉积, 因此具有高重复频率大能量激光输出的潜力。与此同时, 基于 SBS 放大的激光合束技术, 可以输出真正物理意义上的单束激光输出, 实现对输出激光近场与远场的主动调控<sup>[84]</sup>。2019 年, 吕志伟等人提出了利用基于布里渊放大的甚多束激光合束技术<sup>[76]</sup>, 实现紧凑型高平均功率 (100 J、10 ns、10 Hz) 激光输出的方案, 如图 13 所示, 在等通量泵浦光场条件下分别实现了 3 束和 8 束布里渊激光合束, 实现了 60% 以上的能量抽取效率; 针对紧凑型结构设计了单模块 90 J 输出的阵列放大器, 基于该方法可以实现单脉冲能量 100 J、脉冲宽度 10 ns、重复频率 10 Hz 合束激光输出。

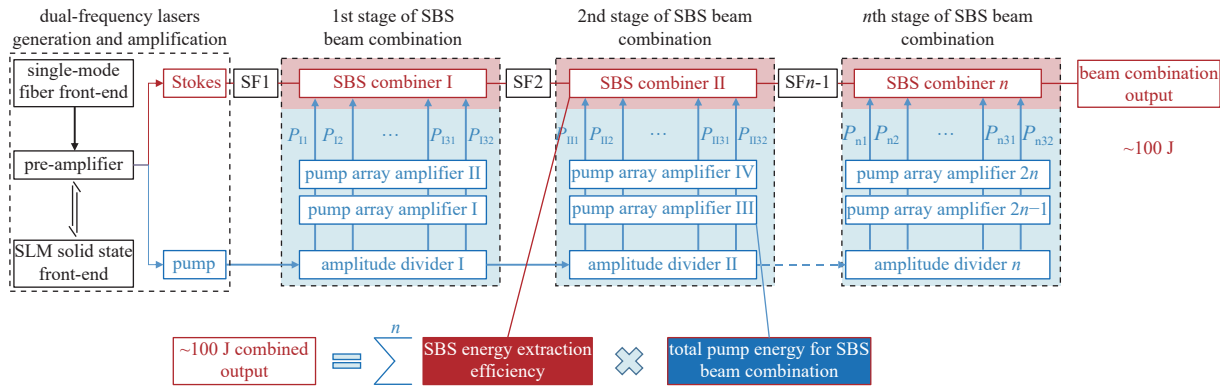


Fig. 13 Design of a repetitive-rated hundred-joule level laser system based on SBS amplification laser beam combining technology<sup>[76]</sup>

图 13 基于 SBS 放大激光合束技术的重复频率百焦耳激光系统设计方案<sup>[76]</sup>

### 3 结论

激光合束技术自被提出以来, 打破了单束激光输出功率受限于泵浦光亮度、系统热效应、非线性效应等诸多不利因素的局面, 其应用覆盖光纤激光器、半导体激光器、全固态激光器等, 对激光功率、单脉冲能量、光束质量都实现了有效的提升。非线性光学激光合束技术, 通过选择合适参数的物质媒介 (包括固体、液体、气体及等离子体等), 可以实现超高峰值功率、超大单脉冲能量的合束激光输出。本文通过对基于光学相位共轭和基于非线性放大两类激光合束技术的原理和实现方式进行了介绍, 针对实现 kW 级重复频率百焦耳级纳秒脉冲激光的应用进行了技术分析, 并设计了技术实现方案。基于液体介质非线性放大的激光合束技术, 通过控制单束 Stokes 光频移实现布里渊频率匹配的激光合束, 简化系统结构; 多路子光束通过小口径激光放大器实现能量增益, 系统在常规冷却条件下可实现赫兹级重复频率工作; 真正涉及高能高热负载问题的合束输出激光, 交由液体布里渊介质及通光口径灵活可控的介质池承载, 很好地解决激光系统负载分配问题, 从而为高峰值功率、高平均功率、高重复频率的高性能激光装置提供了一条可行的技术途径。

### 参考文献:

- [1] Zylstra A B, Kritcher A L, Hurricane O A, et al. Experimental achievement and signatures of ignition at the National Ignition Facility[J]. *Physical Review E*, 2022, 106: 025202.
- [2] Le Pape S, Hopkins L F B, Divol L, et al. Fusion energy output greater than the kinetic energy of an imploding shell at the National Ignition Facility[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120: 245003.
- [3] Srinivas G, Gowda B H H K, Gowda H C, et al. Survey on laser guided missile systems and implementation by developing a laser guidance system[J]. *Global Journal of Electronic and Communication Research*, 2021, 12(1): 1-9.
- [4] Xu Hongfei, Xia Jiqiang, Yuan Zhaohui, et al. Design and implementation of differential drive AGV based on laser guidance[C]//Proceedings of the 2019 3rd International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS). 2019: 112-117.
- [5] Quazi M M, Ishak M, Fazal M A, et al. A comprehensive assessment of laser welding of biomedical devices and implant materials: recent research, development and applications[J]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2021, 46(2): 109-151.
- [6] Sundar R, Ganesh P, Gupta R K, et al. Laser shock peening and its applications: a review[J]. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 2019, 6(4): 424-463.
- [7] Veinhard M, Bellanger S, Daniault L, et al. Orbital angular momentum beams generation from 61 channels coherent beam combining femtosecond digital laser[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(1): 25-28.
- [8] Klenke A, Müller M, Stark H, et al. Coherent beam combination of ultrafast fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24: 0902709.
- [9] Le Dortz J, Heilmann A, Antier M, et al. Highly scalable femtosecond coherent beam combining demonstrated with 19 fibers[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(10):

1887-1890.

- [10] 辛国锋, 皮浩洋, 沈力, 等. 高功率半导体激光器光束非相干合成技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47: 101404. (Xin Guofeng, Pi Haoyang, Shen Li, et al. Beam incoherence combination of high power laser diode[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47: 101404)
- [11] Fan T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(3): 567-577.
- [12] Mcnaught S J, Asman C P, Injeyan H, et al. 100-kW coherently combined Nd: YAG MOPA laser array[C]//Proceedings of the Frontiers in Optics 2009/Laser Science XXV/Fall 2009 OSA Optics & Photonics Technical Digest. 2009: FThD2.
- [13] 吴坚, 马阎星, 马鹏飞, 等. 光纤激光相干合成20 kW级高功率输出[J]. 红外与激光工程, 2021, 50: 20210621. (Wu Jian, Ma Yanxing, Ma Pengfei, et al. Fiber laser coherent synthesis 20 kW class high power output[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50: 20210621)
- [14] 刘泽金, 周朴, 陶汝茂, 等. 高能固态激光阵列光束合成技术浅析[J]. 光学学报, 2011, 31: 0900113. (Liu Zejin, Zhou Pu, Tao Rumao, et al. Analysis of beam combination technology of high-power LD pumped laser array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31: 0900113)
- [15] Wang Dan, Du Qiang, Zhou Tong, et al. Stabilization of the 81-channel coherent beam combination using machine learning[J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 5694-5709.
- [16] Kunkel W M, Leger J R. Passive coherent laser beam combining with spatial mode selecting feedback[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2019, 55: 1600108.
- [17] Cheng Yong, Liu Xu, Wan Qiang, et al. Mutual injection phase locking coherent combination of solid-state lasers based on corner cube[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(23): 5150-5152.
- [18] Linslal C L, Ayyaswamy P, Maji S, et al. Challenges in coherent beam combining of high power fiber amplifiers: a review[J]. *ISSS Journal of Micro and Smart Systems*, 2022, 11(1): 277-293.
- [19] Fathi H, Närhi M, Gumenyuk R. Towards ultimate high-power scaling: Coherent beam combining of fiber lasers[J]. *Photonics*, 2021, 8: 566.
- [20] Fsaifes I, Daniault L, Bellanger S, et al. Coherent beam combining of 61 femtosecond fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20152-20161.
- [21] Ostermeyer M, Kong H J, Kovalev V I, et al. Trends in stimulated Brillouin scattering and optical phase conjugation[J]. *Laser and Particle Beams*, 2008, 26(3): 297-362.
- [22] Mullen R A, Vickers D J, West L, et al. Phase conjugation by stimulated photorefractive scattering using a retroreflected seeding beam[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1992, 9(9): 1726-1734.
- [23] Moyer R H, Valley M, Cimolino M C. Beam combination through stimulated Brillouin scattering[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1988, 5(12): 2473-2489.
- [24] Moore T R, Boyd R W. Three-dimensional simulations of stimulated Brillouin scattering with focused Gaussian beams[J]. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 1996, 5(2): 387-408.
- [25] Heuer A, Menzel R. Principles of phase conjugating Brillouin mirrors[M]//Brignon A, Huignard J P. Phase Conjugate Laser Optics. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc. , 2003: 19-62.
- [26] Fisher R A. Optical phase conjugation[M]. New York: Academic Press, 2012: 50-60.
- [27] Basov N G, Efimkov V F, Zubarev I G, et al. Inversion of Wavefront in SMBS of a depolarized pump[J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 1978, 28(4): 197-201.
- [28] Basov N G, Efimkov V F, Zubarev I G, et al. Influence of certain radiation parameters on wavefront reversal of a pump wave in a Brillouin mirror[J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1979, 9(4): 455-458.
- [29] Basov N G, Efimkov V F, Zubarev I G, et al. Control of the characteristics of reversing mirrors in the amplification regime[J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1981, 11(10): 1335-1337.
- [30] Sumida D S, Jones D C, Rockwell D A. An 8.2 J phase-conjugate solid-state laser coherently combining eight parallel amplifiers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, 30(11): 2617-2627.
- [31] Bowers M W, Boyd R W, Hankla A K. Brillouin-enhanced four-wave-mixing vector phase-conjugate mirror with beam-combining capability[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(6): 360-362.
- [32] Shin Y S. Improvement of spatial beam profiles in beam combination using SBS mirrors[C]//Proceedings of the SPIE 2778, 17th Congress of the International Commission for Optics: Optics for Science and New Technology. 1996: 2778BL.
- [33] Kong H J, Lee J Y, Shin Y S, et al. Beam recombination characteristics in array laser amplification using stimulated Brillouin scattering phase conjugation[J]. *Optical Review*, 1997, 4(2): 277-283.
- [34] Kong H J, Shin Y S, Kim H. Beam combination characteristics in an array laser using stimulated Brillouin scattering phase conjugate mirrors considering partial coherency between the beams[J]. *Fusion Engineering and Design*, 1999, 44(1/4): 407-417.
- [35] Lee S K, Lee D W, Baek D H, et al. Independent phase control of Stokes waves for beam combination[C]//Proceedings of the SPIE 5627, High-Power Lasers and Applications III. 2004: 128-135.
- [36] Kong H J, Lee S K, Lee D W, et al. Phase control of a stimulated Brillouin scattering phase conjugate mirror by a self-generated density modulation[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86: 051111.
- [37] Kong H J, Yoon J W, Shin J S, et al. Long-term stabilized two-beam combination laser amplifier with stimulated Brillouin scattering mirrors[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92: 021120.

- [38] Shin J S, Park S, Kong H J, et al. Phase stabilization of a wave-front dividing four-beam combined amplifier with stimulated Brillouin scattering phase conjugate mirrors[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96: 131116.
- [39] Kong H J, Park S, Cha S, et al. 0.4 J/10 ns/10 kHz-4 kW coherent beam combined laser using stimulated Brillouin scattering phase conjugation mirrors for industrial applications[J]. *Physica Status Solidi (C)*, 2013, 10(6): 962-966.
- [40] Brignon A. Coherent laser beam combining[M]. Wiley-VCH, 2013: 456-457.
- [41] Bowers M W, Boyd R W. Phase locking via Brillouin-enhanced four-wave-mixing phase conjugation[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(4): 634-644.
- [42] Dane C B, Hackel L A. High-average-power, high-brightness Nd: glass laser technology[R]. California: Lawrence Livermore National Laboratory, 1997: 239-245.
- [43] Yoshida H, Nakatsuka M, Hatae T, et al. Two-beam-combined 7.4 J, 50 Hz Q-switch pulsed YAG laser system based on SBS phase conjugation mirror for plasma diagnostics[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(8A): L1038-L1040.
- [44] Trines R M G M, Alves E P, Webb E, et al. New criteria for efficient Raman and Brillouin amplification of laser beams in plasma[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 19875.
- [45] Trines R M G M, Fiúza F, Bingham R, et al. Simulations of efficient Raman amplification into the multipetawatt regime[J]. *Nature Physics*, 2011, 7(1): 87-92.
- [46] Malkin V M, Shvets G, Fisch N J. Fast compression of laser beams to highly overcritical powers[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(22): 4448-4451.
- [47] Wharton K B, Kirkwood R K, Glenzer S H, et al. Observation of energy transfer between identical-frequency laser beams in a flowing plasma[J]. *Physical Review Letters*, 1998, 81(11): 2248-2251.
- [48] Cohen B I, Lasinski B F, Langdon A B, et al. Resonant stimulated Brillouin interaction of opposed laser beams in a drifting plasma[J]. *Physics of Plasmas*, 1998, 5(9): 3408-3415.
- [49] Kruer W L, Wilks S C, Afeyan B B, et al. Energy transfer between crossing laser beams[J]. *Physics of Plasmas*, 1996, 3(1): 382-385.
- [50] Kirkwood R K, Afeyan B B, Kruer W L, et al. Observation of energy transfer between frequency-mismatched laser beams in a large-scale plasma[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 76(12): 2065-2068.
- [51] Kirkwood R K, Williams E A, Cohen B I, et al. Saturation of power transfer between two copropagating laser beams by ion-wave scattering in a single-species plasma[J]. *Physics of Plasmas*, 2005, 12: 112701.
- [52] Seka W, Baldis H A, Fuchs J, et al. Multibeam stimulated Brillouin scattering from hot, solid-target plasmas[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89: 175002.
- [53] Kirkwood R K, Michel P, London R A, et al. Amplification of light in a plasma by stimulated ion acoustic waves driven by multiple crossing pump beams[J]. *Physical Review E*, 2011, 84: 026402.
- [54] Kirkwood R K, Michel P, London R, et al. Multi-beam effects on backscatter and its saturation in experiments with conditions relevant to ignition[J]. *Physics of Plasmas*, 2011, 18: 056311.
- [55] Kirkwood R K, MacGowan B J, Montgomery D S, et al. Effect of ion-wave damping on stimulated Raman scattering in high-Z laser-produced plasmas[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 77(13): 2706-2709.
- [56] Kirkwood R K, Turnbull D P, Chapman T, et al. Plasma-based beam combiner for very high fluence and energy[J]. *Nature Physics*, 2017, 14(1): 80-84.
- [57] Kirkwood R K, Turnbull D P, Chapman T, et al. A plasma amplifier to combine multiple beams at NIF[J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25: 056701.
- [58] Kirkwood R K, Poole P L, Kalantar D H, et al. Production of high fluence laser beams using ion wave plasma optics[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120: 200501.
- [59] Poole P L, Kirkwood R K, Wilks S C, et al. Time-resolved measurement of power transfer in plasma amplifier experiments on NIF[C]//Proceedings of the 2021 Conference on Lasers and Electro-Optics. 2021: 1-2.
- [60] Peng H, Wu Z H, Zuo Y L, et al. Strongly coupled stimulated Brillouin amplification in pump-ionizing plasma[J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15: 026003.
- [61] Jia Xiaobao, Jia Qing, Xiao Jianyuan, et al. Explicit high-order symplectic integrators of coupled Schrodinger equations for pump-probe systems[DB/OL]. arXiv preprint arXiv: 2208.13120, 2022.
- [62] 张锐, 周丹丹, 田小程, 等. 高功率激光装置实现CBET研究所需的四色光输出[J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35: 029901. (Zhang Rui, Zhou Dandan, Tian Xiaocheng, et al. Four-color laser for crossed-beam energy transfer research realized on high power laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35: 029901)
- [63] 白振旭, 杨学宗, 陈晖, 等. 高功率金刚石激光技术研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49: 20201076. (Bai Zhenxu, Yang Xuezhong, Chen Hui, et al. Research progress of high-power diamond laser technology (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49: 20201076)
- [64] McKay A, Spence D J, Coutts D W, et al. Non-collinear beam combining of kilowatt beams in a diamond Raman amplifier[C]//Proceedings of the Advanced Solid State Lasers. 2014: ATu5A. 1.
- [65] McKay A, Mildren R P, Coutts D W, et al. SRS in the strong-focusing regime for Raman amplifiers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(11): 15012-15020.
- [66] McKay A, Spence D J, Coutts D W, et al. Diamond-based concept for combining beams at very high average powers[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11: 1600130.
- [67] 丁迎春, 吕志伟, 何伟明. 受激布里渊散射相位共轭激光束束规律[J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(3): 353-356. (Ding Yingchun, Lv Zhiwei, He Weiming. Study of beam combination by stimulated Brillouin scattering[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(3): 353-356)
- [68] Guo Qi, Lu Zhiwei, Wang Yulei. Highly efficient Brillouin amplification of strong Stokes seed[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96: 221107.



- [69] 郭琦. 受激布里渊散射组束激光器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. (Guo Qi. Research on stimulated Brillouin scattering beam combination laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010)
- [70] 王双义. 基于布里渊放大的激光串行组束中若干关键问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008. (Wang Shuangyi. Investigation of some key problems in serial laser beam combination based on Brillouin amplification[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008)
- [71] 王双义, 林殿阳, 吕志伟, 等. 对受激布里渊散射激光进行组束的数值模拟及方案设计[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(9): 877-880. (Wang Shuangyi, Lin Dianyang, Lv Zhiwei, et al. Numerical simulation and scheme design for laser beam combination of stimulated Brillouin scattering[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(9): 877-880)
- [72] 安习文. 交叉泵浦布里渊放大系统增益特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. (An Xiwen. Investigation of gain properties of non-collinear Brillouin amplification system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013)
- [73] Chen Yi, Lu Zhiwei, Wang Yulei, et al. Phase matching for noncollinear Brillouin amplification based on controlling of frequency shift of stokes seed[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(10): 3047-3049.
- [74] Yuan Hang, Wang Yulei, Yuan Qiang, et al. Amplification of 200-ps high-intensity laser pulses via frequency matching stimulated Brillouin scattering[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7: e41.
- [75] Yuan Hang, Wang Yulei, Lu Zhiwei, et al. Active frequency matching in stimulated Brillouin amplification for production of a 2.4 J, 200 ps laser pulse[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(3): 511-514.
- [76] Cui Can, Wang Yulei, Lu Zhiwei, et al. Joule-level 10 Hz non-collinear multi-pump SBS amplifier with high energy extraction efficiency used for laser beams combination[C]//Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics. 2019: JTu2A. 59.
- [77] Cui Can, Wang Yulei, Lu Zhiwei, et al. Demonstration of 2.5 J, 10 Hz, nanosecond laser beam combination system based on non-collinear Brillouin amplification[J]. *Optics Express*, 2018, 26(25): 32717-32727.
- [78] 张小民, 胡东霞, 许党朋, 等. 浅论强激光系统的物理受限问题[J]. 中国激光, 2021, 48: 1201002. (Zhang Xiaomin, Hu Dongxia, Xu Dangpeng, et al. Physical limitations of high-power, high-energy lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 1201002)
- [79] Banerjee S, Mason P, Phillips J, et al. Pushing the boundaries of diode-pumped solid-state lasers for high-energy applications[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2020, 8: e20.
- [80] De Vido M, Mason P D, Ertel K, et al. The first kilowatt average power 100J-level DPSSL[C]//Proceedings of the 2017 IEEE High Power Diode Lasers and Systems Conference (HPD). 2017: 19-20.
- [81] Divoky M, Sikocinski P, Pilar J, et al. Design of high-energy-class cryogenically cooled Yb<sup>3+</sup>:YAG multislabs laser system with low wavefront distortion[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52: 064201.
- [82] Kong H J, Park S, Cha S, et al. Coherent beam combination laser system using SBS-PCM for high repetition rate solid-state lasers[J]. *Optical Materials*, 2013, 35(4): 807-811.
- [83] Bai Zhenxu, Yuan Hang, Liu Zhaohong, et al. Stimulated Brillouin scattering materials, experimental design and applications: a review[J]. *Optical Materials*, 2018, 75: 626-645.
- [84] Wang Yue, Cui Can, Lu Zhiwei, et al. Beam spatial intensity modification based on stimulated Brillouin amplification[J]. *Optics Express*, 2022, 30(20): 35792-35806.