

基于布里渊放大串行激光组束研究进展

白振旭 王雨雷* 吕志伟 陈义 李森森 远航 刘照虹 崔璨

哈尔滨工业大学航天学院可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 将若干路小能量、低功率的激光进行合成,以获得大能量、高功率激光输出的固体激光器,克服了晶体材料体积、热效应及重复频率的限制,近年来得到迅猛发展。基于受激布里渊散射(SBS)技术的激光组束方法作为该领域极其重要的研究方向之一,受到国内外学者的广泛关注。本文综述了基于布里渊放大的串行激光组束的研究进展,分析了共线及非共线组束方法的特性及SBS组束面临的问题,并对发展方向进行了展望。

关键词 激光器;受激布里渊散射;相位共轭;组束;介质

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.110004

Research Progress of Serial Laser Beam Combination Based on Stimulated Brillouin Amplification

Bai Zhenxu Wang Yulei Lü Zhiwei Chen Yi Li Sensen Yuan Hang
Liu Zhaohong Cui Can

National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract Solid state laser with high energy and high power laser output by combining several low energy and low power beams overcomes the limitation of crystal material volume, thermal effect and the repetition rate, which has made rapid development in recent years. As, based on stimulated Brillouin scattering (SBS), which is one of the most important research directions in this field, laser beam combination method has received extensive attention of scholars all around the world. Present studies on the serial laser beam combination based on stimulated Brillouin amplification are reviewed. Characteristics of collinear and non-collinear methods and SBS laser beam combination problems are analyzed, and the development direction is prospected.

Key words lasers; stimulated Brillouin scattering; phase conjugation; beam combination; media

OCIS codes 140.3280; 140.3298; 140.3535; 140.3580; 290.5900

1 引言

高重复频率、高能量、高功率和高光束质量的激光在惯性约束聚变(ICF)、激光雷达、强场物理、激光冲击强化(LSP)、武器装备、激光加工和快速成形等科研、军事和工业领域有着极其重要的应用,成为当前激光技术研究的热点方向^[1-5]。例如,激光聚变驱动器要求激光脉冲满足能量在兆焦耳级,重复频率在10 Hz左右^[6]。然而通常情况下,单束激光器的输出能量受制于激光晶体材料的最大体积、损伤阈值以及工作介质的热效应引起的光束畸变等因素,致使在确保重复频率和光束质量的情况下能量很难得到进一步提升。

激光组束克服了传统的限制因素,通过将若干路低能量、低功率激光进行合成来获得高功率激光。由于其单路激光运转在小能量、低功率的状态下,因此能够有效地避开单路激光在增加能量和功率方面的诸多限制,是获得高能量、高功率的激光输出的有效途径之一^[7-9]。激光组束在工作原理上可分为非相干组束

收稿日期: 2015-06-03; 收到修改稿日期: 2015-06-30; 网络出版日期: 2015-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(61378007,61138005)

作者简介: 白振旭(1987—),男,博士研究生,主要从事高功率固体激光器及激光组束技术方面的研究。

E-mail: baizhenxu@sina.com

导师简介: 吕志伟(1961—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事高功率激光与非线性光学技术方面的研究。

E-mail: zw_lu@sohu.com

*通信联系人: E-mail: wyl@hit.edu.cn

和相干组束两类^[10-13]。非相干组束分为波长组束和偏振合成,其特点是用于组合的各光束之间线性叠加,不发生干涉。相干组束主要分为非线性光学相位共轭组束、自组织相干组束和主动反馈式激光组束等,其组合方式为相干叠加。理论上, N 束激光非相干组束获得的远场光强分布是各合成光束的线性叠加,输出光强为 N 倍单路激光光强,而相干合成所获得的合成激光远场光强则是各合成光束的强度的物理干涉叠加,即光强可以提高 N^2 倍,可见相干组束不仅可以提高输出功率,还可以提高输出激光的功率密度。其中,基于受激布里渊散射(SBS)原理的激光组束技术,可以把多束激光合并成具有均匀波前的单一相干光束,是一种获得激光聚变驱动器的有效方法,近年来国内外学者对其进行了大量的探索研究^[14-16]。

基于受激布里渊散射的激光组束分为布里渊增强四波混频(BEFWM)相位共轭组束^[17-19]、并行组束^[20-24]和串行组束^[25-26]三类。其中,并行激光组束主要包括重叠耦合组束和后向种子注入组束等;基于布里渊放大技术的串行激光组束包括共线组束和非共线组束。人们对 BEFWM 相位共轭组束和并行激光组束的研究开展较早。本文重点介绍布里渊散射放大技术在组束领域的研究现状,及笔者所在研究团队在此方向上的研究成果,并对基于该技术的不同的组束方法和特点进行分析比较,为高能量、高功率激光组束技术的未来发展提供一定的参考。

2 基于布里渊放大串行激光组束研究进展

基于布里渊放大串行激光组束的概念由哈尔滨工业大学吕志伟课题组于2002年提出,并开展了一系列的研究,其基本思想是利用一束 Stokes 光逐级抽取抽运光的能量,使若干束抽运光的能量向 Stokes 光转移,最终实现多束激光的合成输出。串行组束获得的激光束在物理上是单束相干光。

串行组束过程中 Stokes 光的产生和抽运光的消耗原理如图 1 所示,即 Stokes 光为 SBS 的背向散射光,抽运光由入射光本身的一部分充当。

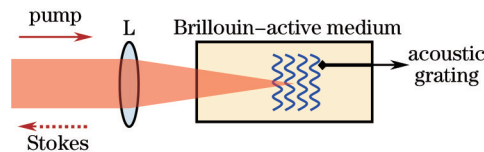


图 1 受激布里渊散射原理

Fig.1 Schematic of stimulated Brillouin scattering

串行激光组束原理是布里渊放大能量抽运效应,即具有相同口径的 Stokes 光和抽运光分别从介质池的两端入射到装有非线性介质的布里渊放大池,两束光在放大池内相互干涉,由电致伸缩力产生空间调制光栅,因为在 SBS 过程中 Stokes 和抽运光具有相当的频率失调,且两束光的相互作用和滞后于干涉模式的调制光栅,使抽运光的能量单方向转移至 Stokes 种子光。在组束过程中,根据 Stokes 光与抽运光在相互作用时是否共线,将基于布里渊放大的串行组束分为共线和非共线两种结构,分别如图 2(a)和(b)所示。

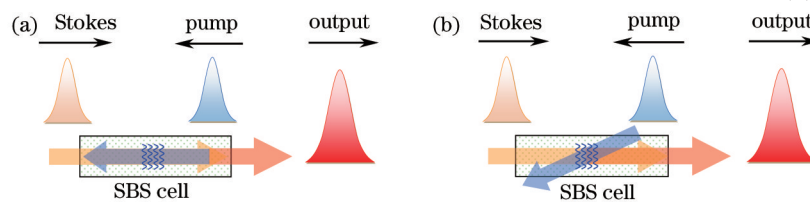


图 2 (a)共线与(b)非共线串行组束示意图

Fig.2 Schematic of (a) collinear and (b) non-collinear serial laser beam combination

2.1 共线串行组束

共线串行组束的典型装置如图 3 所示。图中 M 为全反镜;P 为布儒斯特角偏振片;种子光通常选用单纵模激光,以保证激光具有足够大的相干长度,并降低 SBS 阈值功率密度,从而获得较高的 SBS 背向反射率。种子光经过 1/2 波片和偏振片 P_1 被分为两束。其中反射的垂直偏振光经过 1/4 波片和透镜 L 后聚焦到 SBS 产生池,用于产生 Stokes 光;产生的 Stokes 光经 1/4 波片和偏振片 P_1 从光路中分离出来,然后经 M_3 、1/2 波片、偏振片 P_2 和 1/4 波片后注入到 SBS 放大池。另一束光经由 M_1 、 M_2 、偏振片 P_3 和 1/4 波片后作为抽运光注入 SBS 放大池。Stokes 光与抽运光在 SBS 放大池里相互作用,放大后的 Stokes 光经由 1/4 波片经偏振片 P_3

输出,剩余未被提取的抽运光经偏振片 P_2 入射至光学陷阱吸收。

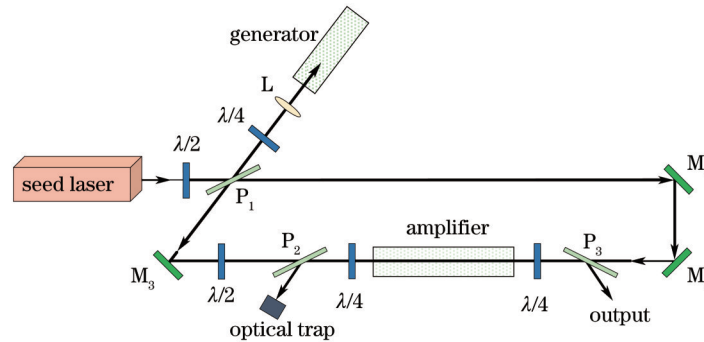


图3 共线串行组束的典型装置

Fig.3 Typical setup of collinear serial laser beam combination

2002年,丁迎春等^[27]提出了基于种子注入型抽运脉冲串的受激布里渊散射组束技术,并研究了组束效率和输出脉宽随脉冲串个数、间隔和抽运功率密度等的简单变化规律。同年,吕志伟等^[28]对共线布里渊放大中抽运光功率密度对放大光的影响进行了探索,结果表明,在种子光参数不变的情况下,增加抽运光功率密度可以提高能量提取效率、种子光放大率、种子光和抽运光的脉宽压缩率。2003年,丁迎春等^[29]对影响布里渊放大光脉冲波形的原因进行了研究,给出了脉冲波形随抽运光功率密度和种子光与抽运光能量比的变化规律。以上研究为串行激光组束奠定了一定的理论和实验基础。

2003年,王双义等^[30]数值模拟了利用6束KrF激光进行组束,其中每束激光能量为45 J,可获得能量为141.89 J,脉宽为670 ps的Stokes输出光。并根据模拟结果设计了两种SBS组束方案,同时,数值模拟还发现在介质的增益系数更大、声子寿命更短的情况下,可以获得脉冲宽度更窄的激光输出。

2006年,王双义等^[31]对高功率情况下影响SBS串行激光组束中Stokes光放大的因素进行了研究。结果表明,当Stokes光功率密度大于抽运光功率密度时,Stokes光仍然可以从抽运光中提取能量,且随着Stokes光功率的增大,Stokes光从抽运光中提取出的能量越多。但是,高功率Stokes光的放大存在一个最大值,这个最大值由抽运光能量、介质吸收系数和介质池长度等参数决定。

2007年,Wang等^[25]对基于布里渊放大的多束结合的可行性进行了分析和理论验证,在两束激光的串行组束实验中采用CCL作为SBS介质,获得了大于80%的组束效率。

2010年,Guo等^[32]设计了一个强信号Stokes光串行放大的实验,当激光重复频率为1 Hz、Stokes光和抽运光的光强比值为39.5/1时,获得了放大效率为85%的激光输出,输出激光能量为400 mJ。

2.2 非共线串行组束

非共线串行组束的典型装置如图4所示,其工作结构与共线装置相类似,只是在放大池内Stokes光与抽运光呈一定的交角相互作用,因此可以省去波片与偏振片,结构更为简化。

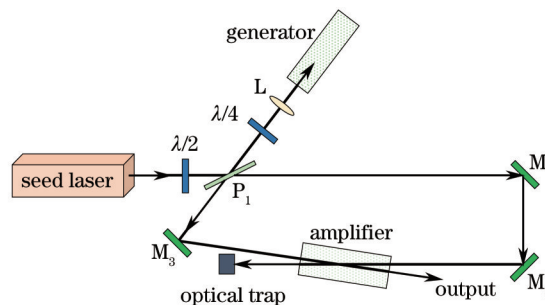


图4 非共线串行组束的典型装置

Fig.4 Typical setup of non-collinear serial laser beam combination

2009年,Wang等^[33]首次提出了基于布里渊放大的非共线串行组束概念,从理论和实验上对影响非共线组束效率的因素进行了分析。利用FC-70液体作为SBS的产生池和放大池,当Stokes光能量为88 mJ,两束抽运光的能量分别为47.1 mJ和41.5 mJ时,得到了80.7%的组束效率。

2009年,王雨雷等^[34]设计了非共线四束激光串行组束的实验,实现了4束工作频率为10 Hz,能量分别为

70.4, 71.3, 78.9, 70.1 mJ 的激光组束, 获得了组束能量为 189 mJ 的输出。同时, 提出了多束抽运非共线布里渊放大串行组束的方案, 结构示意图如图 5 所示, 以提高单个介质池中的抽运光能量, 最终获得高组束能量的输出。

2012 年, He 等^[35]设计了一个采用双信号布里渊放大的方法, 降低较弱的 Stokes 信号的布里渊放大噪声。实验证明非共线强 Stokes 光信号放大可以降低自发布里渊散射(ABS)噪声达两个数量级, 而共线弱 Stokes 光信号只能降低一个数量级。

为了克服在非共线串行组束中, 随着 Stokes 光和抽运光夹角的增大, 放大效率也随之降低的问题, 2014 年, Chen 等^[36]提出了利用不同介质的 SBS 频移不同来弥补因交角过大导致的相位失配, 当工作波长为 532 nm 时, 成功地在 CS₂ 和水中得到了验证。2014 年, 吕志伟等^[37-38]分别设计了双通及波导式非共线组束装置, 通过提高 Stokes 光与抽运光在放大池中的作用次数以提高能量利用率。波导式组束结构如图 6 所示, 利用全反射原理增加了 Stokes 光和抽运光在介质池中的交叉重叠次数, 提高抽运光的利用率, 同时, 介质池内 Stokes 光与抽运光光程相同, 延时可控性高。

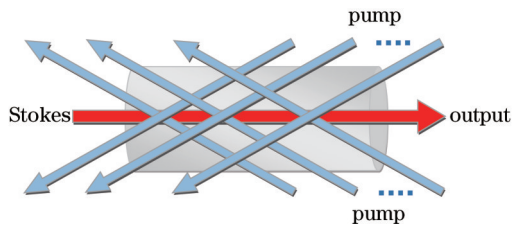


图 5 多束抽运非共线激光串行组束示意图

Fig.5 Schematic of multi-beam pumped non-collinear serial laser beam combination

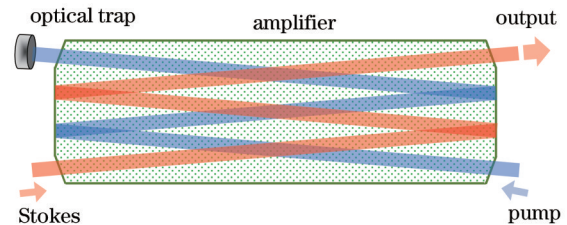


图 6 波导式多程放大结构示意图

Fig.6 Schematic of waveguide multi-pass amplification

2.3 两种串行组束方式对比

在共线的串行组束结构中, 由于 Stokes 光与抽运光为同轴相互作用, 因此在激光能量和介质等参数不变的情况下, 抽运光的提取效率会较高, 且获得输出光的能量分布的均匀性也较高。但是与此同时, 避免相向入射的两束光对光路中的元器件及前端系统造成损伤, 共线结构对系统中组束光的隔离提出了更高的要求。

与共线串行组束相比, 非共线串行组束省去了隔离器、偏振旋光等光学元件, 并且相比于 Stokes 光只能与一束抽运光作用的共线结构, 非共线系统结构简单、可控性更强, 更适用于获得高能量的组束输出和满足工程应用。但是在设计中, 非共线结构需要对组束效率和光束的能量分布进行优化。

3 特点及存在的问题

3.1 基于受激布里渊散射激光组束的方法对比

作为基于 SBS 激光组束的三种常见方法, BEFWM 相位共轭组束、并行组束和串行组束各自具有其特点。

基于 BEFWM 相位共轭组束利用四波混频原理获得共轭光, 并通过光束在介质中产生的声子光栅实现共轭光的相位锁定。该组束方式的组束效率较高, 系统的失调灵敏度低, 但是对参与组束的抽运光光束质量要求高, 同时需要参与组束的各光束共交点, 调节和实现的难度较大。

基于受激布里渊相位共轭并行激光组束技术与多路激光相干组束类似, 即通过精密的相位控制, 使多路激光的输出相位保持一致, 来实现若干束参与组束激光的叠加, 获得高能量或高功率输出。这种方式获得的组束光波前均匀性高, 每一个分束激光的能量相对较小, 对 SBS 相位共轭镜(SBS-PCM)的抗损伤要求较低, 但是该结构需要高精度相位控制器对参与组束各光束进行相位控制, 操作较为繁琐, 并且由于每一路组束光均包含一个 SBS-PCM, 随着组束数量的增加, 系统结构更为复杂, 拓展难度也随之较大。

基于布里渊放大的串行组束属于被动组束, 无需对激光相位进行测量和精确控制, 降低了系统的失调灵敏度, 同时具有结构简单、负载能力高和可拓展能力强的特点, 更容易实现光束合成, 将在未来实现大能量和多束的组束中, 具有更大的优势和工程应用前景。但是, 由于最终输出的组束光能量集中在一个 SBS 介质池中, 因此在设计中需要考虑介质的热影响和损伤问题。

3.2 存在的问题分析

虽然串行激光组束技术相比于 BEFWM 相位共轭组束和并行组束具有其独有的优点,但是基于受激布里渊散射组束技术仍存在一些共有的难题亟待人们解决。

3.2.1 SBS 介质的特性

由于不同的 SBS 介质在不同条件下具有相异的增益系数、SBS 线宽、声子寿命、吸收系数和产生及击穿阈值等^[39-41],因此在利用基于 SBS 的方式进行组束的过程中,选择合适的 SBS 介质将具有很大的意义。

目前可应用于 SBS 介质的材料包括以重氟碳系列为代表的液体介质^[42]、熔石英为代表的固体介质^[43]以及 CF₄ 气体为代表的气体介质^[44]。液体材料是当前使用最多的 SBS 介质,增益系数相对较高,但是如 CCl₄、丙酮等多为易挥发的有毒物质;固体材料结构稳定性更强,不易受环境因素影响,但是一旦产生光学损伤便不可恢复;气体材料击穿阈值高,但是对密封和气压要求严格^[45]。表 1 为三类介质的基本特性对比。

表 1 液体、固体和气体 SBS 介质特性对比

Table 1 Comparison of liquid, solid and gas SBS medium

Medium type	Representatives	Advantages	Shortcomings
Liquid	perfluorocarbon, CCl ₄	simple structure, strong controllability	some medium are toxic; difficult to produce and purify
Solid	fused quartz, organic crystal	compact structure, narrow SBS line width	difficult to generate large size; low breakdown threshold
Gas	SF ₆ , Xe	high breakdown threshold	low gain coefficient; difficult to control

即使是处以同一状态的介质材料,也因其具体材料的不同具有明显的差异。例如在液体材料中,水在波长为 300~600 nm 范围内具有高透射率(吸收系数 $\alpha < 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$),而在如 1064 nm 的近红外区域却具有很高的吸收系数($\alpha \approx 0.5 \text{ cm}^{-1}$);而重氟碳的 FC-72 和 FC-75 却在近红外区域具有极低的吸收率($\alpha < 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$),如此在使用过程中人们经常在 532 nm 的波长范围附近利用水作为 SBS 介质,在 1064 nm 波长附近利用 FC-72 或 FC-75 作为 SBS 介质^[46]。但是 SBS 介质必然会对激光能量产生一定的吸收,导致对 SBS 的产生和组束激光的稳定性造成了一定的影响,如光束漂移和能量抖动等。同时,往往具有高增益系数的介质(如 CS₂)的击穿阈值相对较低、吸收系数较高。因此,介质问题是在 SBS 组束激光器的设计中所不可规避的,特别是随着能量和重复频率的提高,选择合适的 SBS 介质、解决介质的热效应和恢复时间等问题显得尤为重要^[47-48]。

3.2.2 光束质量控制

目前针对 SBS 组束固体激光器的研究主要集中于能量和效率的提升,对输出光束质量的评价和改善的研究相对较少,但是在实际应用中激光的光束质量参数对应用有着重要的影响。例如在 ICF、激光测距和反导系统等应用中,如果组束激光没有好的光束质量,激光到达核聚变靶丸、测距卫星和导弹的光斑的能量将很分散,功率密度和能量均匀性都会变差,难以达预期的应用目的^[49-50]。因此,在获得组束激光输出的同时,仍需要对其光强分布、发散角、波前畸变、能量稳定性和指向稳定性等光束质量因子进行评估和控制,同时对影响输出激光光速质量的因素和补偿方法展开深入的研究^[51-53]。

3.2.3 系统结构设计

由于大能量的固体激光组束系统结构相对复杂、体积较大,无疑限制了其在工业和科研上的应用。目前,组束激光器普遍采用的构建方式为平台式结构,该结构中各器件在一个水平面上,占地面积较大,集成化程度低,并且随着参与组束的激光束数量增加,装置的空间排布更为复杂、很难实现进一步有效叠加,稳定性也难免会随之变差。因此,如何有效进行组束激光系统光学器件的空间排布、提高系统的稳定性和结构紧凑性将是组束激光器未来发展的重要方向。在结构设计中,可以采用诸如桁架结构、分层式结构、模块化结构等提高空间利用率^[54-55];在系统稳定性方面,可以通过选择低形变硬型材料为平台、简化光学器件结构、减少可调节器件数量、优化激光模块设计降低无效热量释放等提高稳定性,进而实现结构小型化。

4 结 论

基于受激布里渊散射的激光组束技术具备了组束技术具有不受晶体尺寸限制和克服了热效应的优点,同时在光束质量优化方面具有很大的优势。特别是基于布里渊放大的串行激光组束技术,具有更高的灵活

性和可拓展性,在未来具有极大的应用潜力。随着光学器件的制备工艺逐渐成熟,人们对新型SBS介质的不断研究,以及新型材料和机械结构的不断涌现,具有结构紧凑、高重复频率和高稳定的基于布里渊放大串行组束激光器有望实现大能量的激光输出,在科研、国防和工业领域发挥更大的作用。

参 考 文 献

- 1 B M Van Wousterghem, S C Burkhart, C A Haynam, *et al.*. National ignition facility commissioning and performance[C]. SPIE, 2004, 5341: 55-65.
- 2 Sun Quan, Zhou Jinglun, Wei Xiaofeng, *et al.*. System reliability research about the inertial confinement fusion laser driver [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, 40(1): 12-15.
孙 权, 周经伦, 魏晓峰, 等. 惯性约束聚变激光装置系统可靠性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, 40(1): 12-15.
- 3 J P Chu, J M Rigsbee, G Banas, *et al.*. Laser-shock processing effects on surface microstructure and mechanical properties of low carbon steel[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1999, 260(1-2): 260-268.
- 4 Yu Yong, Li Yan, Mao Yindun, *et al.*. Experiment observations of space debris integrating laser ranging and optical direction measurement[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2013, 10(4): 359-364.
于 涌, 李 岩, 毛银盾, 等. 空间碎片激光测距与光学测角一体化观测试验[J]. *天文研究与技术*, 2013, 10(4): 359-364.
- 5 Ding Yingchun, Lü Zhiwei, Zhao Xiaoyan, *et al.*. Current situation and outlook for beam combination by stimulated Brillouin scattering[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2000, 37(5): 7-12.
丁迎春, 吕志伟, 赵晓彦, 等. 受激布里渊散射相位共轭组束的研究现状和发展前景[J]. *激光与光电子学进展*, 2000, 37(5): 7-12.
- 6 H J Kong, J W Yoon, J S Shin, *et al.*. Long term stabilization of the beam combination laser with a phase controlled stimulated Brillouin scattering phase conjugation mirrors for the laser fusion driver[J]. *Laser Part Beams*, 2006, 24(4): 519-523.
- 7 H J Kong, J W Yoon, D H. Beak, *et al.*. Laser fusion driver using stimulated Brillouin scattering phase conjugate mirrors by a self-density modulation[J]. *Laser Part Beams*, 2007, 25(2): 225-238.
- 8 Chen Jinbao, Guo Shaofeng. Review on technical approaches of high energy solid-state-lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0602006.
陈金宝, 郭少锋. 高能固态激光器技术路线分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0602006.
- 9 Mu Jie, Jing Feng, Wang Xiao, *et al.*. Error control of piston and tilt based on SPGD in coherent beam combination[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0602002.
母 杰, 景 峰, 王 道, 等. 相干合成中基于SPGD算法的平移误差和倾斜误差控制[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0602002.
- 10 D N Wang, Y N Ning, K T V Grattan, *et al.*. Three-wavelength combination source for white-light interferometry[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(11): 1350-1352.
- 11 T Y Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE, Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(3): 567-577.
- 12 Armen Sevian, Oleksiy Andrusyak, Igor Ciapurin, *et al.*. Efficient power scaling of laser radiation by spectral beam combining [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(4): 384-386.
- 13 S J Augst, T Y Fan, A Sanchez. Coherent beam combining and phase noise measurements of ytterbium fiber amplifiers[J]. *Opt Lett*, 2008, 29(5): 474-476.
- 14 Hong Jin Kong, Seong Ku Lee, Dong Won Lee. Beam combined laser fusion driver with high power and high repetition rate using stimulated Brillouin scattering phase conjugation mirrors and self-phase-locking [J]. *Laser and Particle Beams*, 2005, 23(1): 55-59.
- 15 T Omatsu, H J Kong, S Park, *et al.*. The current trends in SBS and phase conjugation[J]. *Laser and Particle Beams*, 2012, 30(1): 117-174.
- 16 Hong Jin Kong, Jae Sung Shin, Du Hyun Beak, *et al.*. Current trends in laser fusion driver and beam combination laser systems using stimulated Brillouin scattering phase conjugate mirrors for a fusion driver[J]. *Journal of Korean Physical Society*, 2010, 56(1): 177-183.
- 17 Tang Qianjing, Hu Qiquan. Progress of Brillouin-enhanced four-wave mixing in laser beam combining[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(1): 40-45.
唐前进, 胡企铨. 布里渊增强四波混频组束研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(1): 40-45.
- 18 Damzen M J, Vlad V I, Babin V, *et al.*. *Stimulated Brillouin Scattering Fundamentals and Applications*[M]. London: Institute

- of Physics, 2003.
- 19 M Dubinskii, M J Ferry, J R Goff, *et al.*. Highly scalable high repetition rate Nd: YAG laser based on coherent beam coupling [C]. CLEO, 2003: CThZ1.
- 20 Hong Jin Kong, Jae Yong Lee, Yu Sup Shin, *et al.*. Beam recombination characteristics in array laser amplification using stimulated Brillouin scattering phase conjugation[J]. Opt Rev, 1997, 4(2): 277-283.
- 21 Hidetsugu Yoshida, Masahiro Nakatsuka, *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): 1038-1040.
- 22 Seong Ku Lee, Hong Jin Kong, Masahiro Nakatsuka. Great improvement of phase controlling of the entirely independent stimulated Brillouin scattering phase conjugate mirrors by balancing the pump energies[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(16): 161109.
- 23 Hong Jin Kong, Sangwoo Park, Seongwoo Cha, *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]. Phys Status Solidi C, 2013, 10(6): 962-966.
- 24 Hong Jin Kong, Sangwoo Park, Seongwoo Cha, *et al.*. Conceptual design of the Kumgang laser: a high-power coherent beam combination laser using SC-SBS-PCMs towards a dream laser[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2015, 3(1): 1-13.
- 25 Shuangyi Wang, Zhiwei Lü, Dianyng Lin, *et al.*. Investigation of serial coherent laser beam combination based on Brillouin amplification[J]. Laser and Particle Beams, 2007, 25(1): 79-83.
- 26 Zhiwei Lu, Wei Gao, Weiming He, *et al.*. High amplification and low noise achieved by a double-stage non-collinear Brillouin amplifier[J]. Opt Express, 2010, 17(13): 10675-10680.
- 27 Ding Yingchun, Lü Zhiwei, He Weiming. Study of beam combination by stimulated Brillouin scattering[J]. High Power Laser and Partical Beams, 2002, 14(3):353-356.
丁迎春, 吕志伟, 何伟明. 受激布里渊散射相位共轭激光组束规律[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(3): 353-356.
- 28 Lü Zhiwei, Ding Yingchun, He Weiming. The influence of pump power density on brillouin amplification[J]. Acta Physica Sinica, 2002, 51(6): 1286-1290.
吕志伟, 丁迎春, 何伟明. 抽运功率密度对布里渊放大的影响[J]. 物理学报, 2002, 51(6): 1286-1290.
- 29 Ding Yingchun, Lü Zhiwei, He Weiming. Study on pulse waveform of stimulated Brillouin amplification[J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(9): 2165-2169.
丁迎春, 吕志伟, 何伟明. 布里渊放大光脉冲波形的研究[J]. 物理学报, 2003, 52(9): 2165-2169.
- 30 Wang Shuangyi, Lin Dianyng, Lü Zhiwei, *et al.*. Numerical simulation and scheme design for laser beam combination of stimulated Brillouin scattering [J]. High Power Laser and Partical Beams, 2003, 15(9): 877-880.
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.
- 31 Wang Shuanyi, Lü Zhiwei, Lin Dianyng, *et al.*. Amplification of high-power Stokes beam in laser beam combination by stimulated Brillouin scattering[J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(S): 111-113.
王双义, 吕志伟, 林殿阳, 等. 受激布里渊散射激光组束中高功率斯托克斯光的放大[J]. 中国激光, 2006, 33(增刊): 111-113.
- 32 Qi Guo, Zhiwei Lu, Yulei Wang. Highly efficient Brillouin amplification of strong Stokes seed[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96: 221107.
- 33 Y L Wang, Z W Lu, S Y Wang, *et al.*. Investigation on efficiency of non-collinear serial laser beam combination based on Brillouin amplification[J]. Laser and Particle Beams, 2009, 27(4): 651-655.
- 34 Wang Yulei, Lü Zhiwei, Wang Shuangyi, *et al.*. Investigation on a four-beam serial laser combination for a non-collinear scheme based on Brillouin amplification[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(7): 4675-4679.
王雨雷, 吕志伟, 王双义, 等. 基于布里渊放大的非共线四束激光串行组束的研究[J]. 物理学报, 2009, 58(7): 4675-4679.
- 35 Weiming He, Hongbo Liu, Wuliji Hasi, *et al.*. Investigation on the noise suppression of Brillouin amplification for weak Stokes signals[C]. ICOM, 2012: 228-231.
- 36 Yi Chen, Zhiwei Lu, Yulei Wang, *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.
- 37 Lü Zhiwei, Bai Zhenxu, Chen Yi, *et al.*. A serial laser beam combination based on stimulated Brillouin amplification used two-dimensional waveguide type medium cell[P]. China Patent: 201410578271.5, 2014-10-25.
- 38 Lü Zhiwei, Bai Zhenxu, Chen Yi, *et al.*. Non-collinear double-pass amplification method and non-collinear double-pass

- beam combination device based on stimulated Brillouin scattering[P]. China Patent: 201410577933.7, 2014-10-24.
- 39 Hyunmin Park, Changwhan Lim, Hidetsugu Yoshida, *et al.*. Measurement of stimulated Brillouin scattering characteristics in heavy fluorocarbon liquids and perfluoropolyether liquids[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45(6A): 5073-5075.
- 40 W L J Hasi, Z W Lu, S Gong, *et al.*. Investigation of stimulated Brillouin scattering media perfluoro-compound and perfluoropolyether with a low absorption coefficient and high power-load ability[J]. Applied Optics, 2008, 47(7): 1010-1014.
- 41 Hidetsugu Yoshida, Villiam Kmetik, Hisanori Fujita, *et al.*. Heavy fluorocarbon liquids for a phase-conjugated stimulated Brillouin scattering mirror[J]. Applied Optics, 1997, 36(16): 3739-3744.
- 42 Viliam KMETIK, Tadashi KANABE, Hisanori FUJITA, *et al.*. Optical absorption in fluorocarbon liquids for the high energy stimulated Brillouin scattering phase conjugation and compression[J]. Rev Laser Eng, 1998, 26(4): 322-327.
- 43 Hidetsugu Yoshida, Hisanori Fujita, Masahiro Nakatsuka, *et al.*. Fused-quartz glass with low optical quality as a high damage-resistant stimulated Brillouin-scattering phase-conjugation mirror[J]. Optics Communications, 2003, 222: 257-267.
- 44 David E Bliss, Michael T Valley, Briggs W Atherton, *et al.*. Phase conjugation of high energy lasers[R]. California: Sandia National Laboratories, 2013.
- 45 Zhu Chengyu, Lü Zhiwei, He Weiming, *et al.*. Solid SBS media and entirely solidification of the SBS phase-conjugation mirrors [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(3): 65-68.
朱成禹, 吕志伟, 何伟明, 等. 固体SBS介质与SBS相位共轭镜的全固化[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(3): 65-68.
- 46 Xiaozhen Xu, Chengyong Feng, Jean-Claude Diels. Optimizing sub-ns pulse compression for high energy application[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 13905-13915.
- 47 Wang Haocheng, Fan Zhongwei, Yu Jin, *et al.*. Research progress of high repetition rate and high power laser with SBS-phase conjugate mirror[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040001.
王昊成, 樊仲维, 余 锦, 等. 带SBS相位共轭镜的高重复频率高功率激光系统研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51 (4): 040001.
- 48 He Xingdao, Xu Jinjun, Shi Jiulin, *et al.*. Influences of optical breakdown on wideband SBS and forward SRS[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0619005.
何兴道, 徐进军, 史久林, 等. 光学击穿对宽带受激布里渊散射及受激拉曼散射特性的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0619005.
- 49 Yang Yuchuan, Jing Feng, Li Fuquan, *et al.*. Laser driver beam combination for fast ignition[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(3): 697-701.
杨雨川, 景 峰, 李富全, 等. 用于快点火的激光驱动器组束方式[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(3): 697-701.
- 50 Hou Rui, Zhao Shanghong, Xu Jie, *et al.*. The analysis of military application foreground of combined laser[J]. Laser Journal, 2008, 29(3): 4-5.
侯 睿, 赵尚弘, 胥 杰, 等. 组束激光的军事应用前景分析[J]. 激光杂志, 2008, 29(3): 4-5.
- 51 Mu Jie, Wang Xiao, Jing Feng, *et al.*. Effect of wavefront distortion on coherent beam combination in high-power laser facilities[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0602010.
母 杰, 王 道, 景 峰, 等. 高功率激光装置中波前畸变对相干合成的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0602010.
- 52 Li Sensen, Wang Yulei, Lu Zhiwei, *et al.*. High-quality near-field beam achieved in a high-power laser based on SLM adaptive beam-shaping system[J]. Optics Express, 2015, 23(2): 681-689.
- 53 Jiao Zhaoyang, Zhang Yanli, Zhang Junyong, *et al.*. Influence of phase distortion on near field beam quality in final target system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0502004.
焦兆阳, 张艳丽, 张军勇, 等. 终端靶场中相位畸变对近场光束质量的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0502004.
- 54 Lü Zhiwei, Li Sensen, Wang Yulei, *et al.*. A two-sided stereo optical path truss type solid state laser[P]. China Patent: 201410850518.4, 2014-12-30.
- 55 Lü Zhiwei, Bai Zhenxu. Modular non-collinear serial beam combination laser based on stimulated Brillouin scattering[P]. China Patent: 201510148102.2, 2015-03-31.