



·强激光物理与技术·综述·

受激布里渊散射脉冲压缩技术研究进展*

廉玉东^{1,2,3}, 王禹贺^{1,2}, 章雨琴^{1,2}, 韩世伟^{1,2}, 虞洋^{1,2}, 齐莹^{1,2},
栾楠楠³, 白振旭^{1,2,3}, 王雨雷^{1,2,3}, 吕志伟^{1,2,3}

(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. 天津市电子材料与器件重点实验室, 天津 300401)

摘 要: 受激布里渊散射(SBS)作为三阶光学效应广泛应用于激光组束、分布式光纤传感、布里渊激光器等领域。近年来, SBS 脉冲压缩亦得到特殊关注。基于布里渊放大过程中的能量转移特性, SBS 脉冲压缩技术能够将 ns 量级脉冲压缩至亚 ns 量级, 峰值功率可提升 1~2 个数量级。系统介绍了 SBS 脉冲压缩基本理论, 综合论述了 SBS 压缩器结构、增益介质、泵浦脉冲等因素对脉冲压缩特性的影响, 并对 SBS 脉冲压缩发展趋势进行了展望, 为今后 SBS 特性的研究提供了有益参考, 也为高重频、高能量激光的获取提供了可行方案。

关键词: 受激布里渊散射; 脉冲压缩; 增益介质; 声子寿命; 泵浦脉冲

中图分类号: O437.2

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210006

Research progress of stimulated Brillouin scattering pulse compression technique

Lian Yudong^{1,2,3}, Wang Yuhe^{1,2}, Zhang Yuqin^{1,2}, Han Shiwei^{1,2}, Yu Yang^{1,2}, Qi Xuan^{1,2},
Luan Nannan³, Bai Zhenxu^{1,2,3}, Wang Yulei^{1,2,3}, Lü Zhiwei^{1,2,3}

(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. Tianjin Key Laboratory of Electronic Materials and Devices, Tianjin 300401, China)

Abstract: Stimulated Brillouin scattering (SBS) as a third-order optical effect is widely used in laser beam combination, distributed fiber sensing, Brillouin lasers and other fields. In recent years, SBS pulse compression has also received special attention. Based on the energy transfer characteristics of the Brillouin amplification process, SBS pulse compression technology can compress nanosecond pulses to sub-nanosecond levels, and the peak power can be increased by 1-2 orders of magnitude. This paper systematically introduces the basic theory of SBS pulse compression, comprehensively discusses the influence of SBS compressor structure, gain medium, pump pulse and other factors on pulse compression characteristics, and looks forward to the development trends of SBS pulse compression. It provides a useful reference for the future study of SBS characteristics and a feasible scheme for the acquisition of high repetition frequency and high energy laser.

Key words: stimulated Brillouin scattering; pulse compression; gain medium; phonon lifetime; pump pulse

近年来, 超快光学的快速发展极大提高了工业加工和传感探测的精度与稳定性。其中皮秒激光器所具有的高能量、短脉宽特性使其广泛应用于工业微纳加工、超远光学测量及生物医疗等领域。而受激布里渊散射(SBS)是产生高能量 ps 量级激光的有效方法。此外, 由核聚变带来的巨大能量供应得到越来越多的重视, 惯性约束聚变(ICF)方案的提出为解决能源紧缺问题带来了曙光。冲击点火^[1-4]作为 ICF 的关键技术, 其过程需要一个高峰值功

* 收稿日期: 2021-01-05; 修订日期: 2021-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(61905062, 61905061, 61927815, 62075056); 中国博士后科学基金项目(2020M670613); 河北省博士后择优资助项目(B2020003026); 河北省自然科学基金项目(F2019202294); 河北省科技创新战略资助项目(20180601); 全光网络与现代通信网教育部重点实验室(北京交通大学)项目(AON2019005)

作者简介: 廉玉东(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事高功率固体激光技术及应用研究。

通信作者: 王禹贺(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事 SBS 脉冲压缩及激光探测方面的研究。

率、高能量的窄脉冲来轰击靶丸,对于这种短脉冲的获取,研究人员提供了多种方案。相比于传统的锁模^[5-6]或啁啾^[7]压缩方案,利用SBS脉冲压缩获取这种特殊脉冲的方法更简单;相比于交叉相位调制^[8-9]和光孤子效应^[10-11]压缩技术,SBS脉冲压缩具备较高的能量转换效率和脉冲压缩比^[12-16]。

作为典型的三阶光学效应,SBS可解释为泵浦光与斯托克斯(Stokes)光在声场中的非线性相互作用^[17-18]。泵浦光作用下,增益介质内部产生电致伸缩效应并出现相干声场。泵浦光与Stokes光在声场中耦合并进行能量交换,最终反向传输的Stokes光得到增强^[19]。目前,除了应用到激光组束^[20-22]、分布式光纤传感^[23-25]、布里渊激光器^[26]领域,SBS在相位共轭^[27-29]、快慢光^[30-32]和布里渊增强四波混频^[33-35]方面均表现出了良好特性。基于SBS的脉冲压缩技术利用SBS的非线性特性,在高效的能量转换下,实现将脉冲宽度从ns压缩到亚ns甚至更短的设计。在对SBS脉冲压缩的深入探索中,研究人员发现无论是压缩系统还是结构参数都对Stokes脉冲的宽度、能量和峰值功率造成影响。目前常用的SBS压缩器包括单池、紧凑双池和独立双池结构^[36-39],反应池数量及结构设计是实现超短压缩的重要环节。泵浦脉冲作为SBS效应产生的激励源,其能量、形状和稳定性将对最终压缩结果产生直接影响^[40-42]。针对不同种类的布里渊介质,其SBS阈值、增益系数和声子寿命的差异会影响最终压缩效果,目前应用较多的介质包括全氟碳液体(PFCs)、全氟聚醚液体(PFPE)和部分固体介质。影响压缩性能的因素还有光学器件的搭建和调整,其中包括器件的间距、透镜焦距和反应池长,它们共同影响了两脉冲的相互作用长度^[43-44]。此外,高泵浦频率引起的热聚焦效应会影响压缩脉冲的光束质量和系统稳定性,可以通过介质提纯优化或利用SBS高共轭保真度来改善系统性能。此外,SBS增益饱和特性及耦合弛豫时间限制了Stokes脉冲的压缩极限,SBS与其他压缩技术结合为实现超短压缩提供了解决方案。

本文对SBS脉冲压缩技术的研究进展进行了综述。从SBS脉冲压缩理论的介绍入手,综合分析了压缩器结构、泵浦脉冲、增益介质及光学器件搭建等会对压缩结果产生影响的内外部因素,最后总结SBS压缩技术在高重复频率、超短压缩方面的局限性并指出其未来在实际应用中的发展方向。

1 SBS脉冲压缩基本原理

基于SBS脉冲压缩的原理如图1所示,其中红色为正向入射的泵浦脉冲,绿色是反向传输的Stokes脉冲。在声场作用下,Stokes脉冲前沿率先与泵浦接触,后沿不参与或仅有少部分参与耦合。能量转换过程中,脉冲前沿在饱和增益影响下大量抽取泵浦能量,峰值功率迅速提升,从而实现脉冲压缩^[39]。

在SBS理论中,泵浦光和Stokes光的耦合过程遵循麦克斯韦方程组,并用Navier-Stokes方程来阐释声波场^[40-45],其耦合波方程描述为

$$\frac{\partial E_L}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial E_L}{\partial t} + \frac{\alpha}{2} E_L = -igvE_S \quad (1)$$

$$-\frac{\partial E_S}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial E_S}{\partial t} + \frac{\alpha}{2} E_S = -igv^* E_L \quad (2)$$

$$v(z,t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t f(t-\tau) E_L(z,\tau) E_S^*(z,\tau) d\tau \quad (3)$$

$$f(t) = \frac{-\sqrt{2\pi}\Omega_B \exp(-(\Gamma_B/2)t) \exp(i\Omega_B t) \sin\left(\sqrt{\Omega_B - \frac{\Gamma_B^2}{4}} t\right)}{\sqrt{\Omega_B - \frac{\Gamma_B^2}{4}}} \quad (t \geq 0) \quad (4)$$

式中: i 为虚数单位; v 为介质中密度振幅; E_L 与 E_S 分别为泵浦光与Stokes光振幅; g 为布里渊增益系数; n 是介质折射率; c 是光速; α 为介质吸收系数; Ω_B 为泵浦光与Stokes光之间的频移; Γ_B 为布里渊线宽; $f(t)$ 为SBS过程谱增益 $f(\omega)$ 的傅里叶逆变换。

2 SBS脉冲压缩器

脉冲压缩器搭建了SBS产生的实验环境,其中反应池长度、间距以及光学器件参数都会对脉冲压缩效果产生

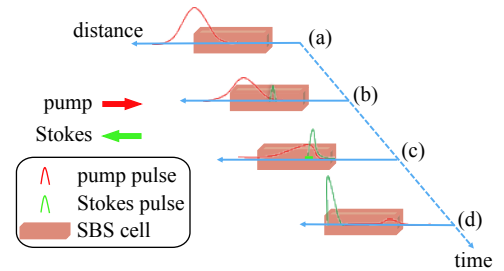


Fig. 1 Schematic diagram of the interaction between pump pulse and Stokes pulse

图1 泵浦脉冲与斯托克斯脉冲相互作用图

影响。为了提高压缩器的击穿阈值以获得能量更高的超短脉冲,研究人员在单池基础上设计了紧凑双池和独立双池压缩器。人们目前利用紧凑双池结构实现了脉冲宽度从 13 ns 到 160 ps 的输出;利用独立双池结构实现了 12 ns 到 300 ps 的输出,且输出能量高达 1.2 J。本节针对单池、紧凑双池和独立双池结构,从压缩器组成、特点及应用等方面进行了介绍。

2.1 单池脉冲压缩器

单池结构主要由增益介质池和长焦距透镜组成,如图 2(a)所示,透镜焦距近似等于泵浦宽度对应光程的一半^[35]。最早的脉冲压缩实验在锥形波导中完成,如图 2(b)所示。泵浦功率密度会随锥形直径的减小而增大,因而其具有入射能量可控和结构简单等特点^[46]。Hon^[47]使用锥形波导首次对 SBS 脉冲压缩特性进行研究。实验以甲烷为介质,将 20 ns 的 Nd:YAG 脉冲压缩为 2 ns 的相位共轭脉冲。

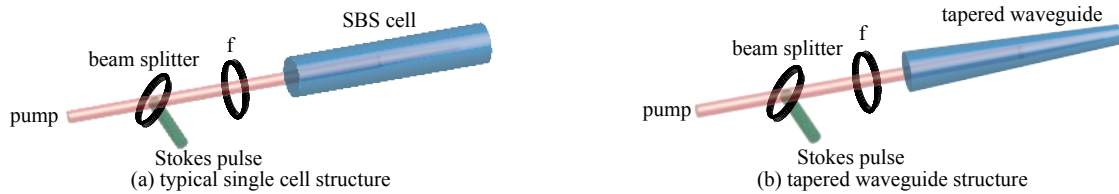


Fig. 2 Schematic diagram of single cell structure

图 2 单池结构原理图

单池结构的 SBS 压缩特性对泵浦脉冲强度变化很敏感。若泵浦脉冲强度远超阈值,两脉冲的初始作用点将靠近输入端,使 Stokes 脉冲前沿与泵浦脉冲的有效作用距离减少;若泵浦脉冲的强度不足以在很短时间内产生 SBS 效应,就会使两脉冲相互作用的起始时间延迟,能量转换效率降低。在早期, Davydov^[48]利用单池结构,将红宝石激光器产生的巨脉冲(30~50 ns)压缩到 1.2~2.5 ns 范围。Neshev^[49]提出紧凑单池结构,获得了时域宽度小于 200 ps 的压缩脉冲。2010 年, Guo 等^[50]利用双单池并以“双级压缩,子峰能量主峰提取”为控制手段,解决了压缩过程的多峰调制现象。Mitra 等^[51]将产生和放大过程融合到一个单池中,构建了特殊的集成式产生-放大单池结构,最终获得了 600 ps 的 Stokes 脉冲。Bai^[52]构建单池系统将 SBS 脉冲压缩产生的波长为 1064 nm 的 450 ps 脉冲通过非线性晶体 KDP 进行倍频,获得了小于 450 ps,最大能量达到 227 mJ 的 532 nm 压缩脉冲。

2.2 紧凑双池脉冲压缩器

紧凑双池指的是产生池和放大池在紧凑双池结构中紧密放置,并在两池间插入短聚焦透镜,如图 3 所示。

泵浦脉冲的强聚焦在产生池中激励出优质 Stokes 种子脉冲,后者在放大池中与剩余泵浦脉冲进行能量转换。Schliemann^[53]采用紧凑双池装置对倍频 YAG 激光进行脉冲压缩,最大压缩因子达到 21,反射率为 75%。文献[42]采用加入衰减的双池装置,有效抑制了压缩脉冲的尾部展宽,最终获得了 284 ps 的压缩脉冲,转换效率达到 51%。Liu 等^[54]利用紧凑双池进行了 SBS 与激光诱导击穿(LIB)串联压缩实验,最终得到 170 ps 的 Stokes 脉冲。Bai 等^[55]利用紧凑双池设计了一种高能量-亚纳秒紫外激光器,通过 LiB₃O₅ 晶体实现对 Stokes 脉冲的腔外倍频。实验发现经过 II 类相位匹配的输出光宽度会随频率增大而减小,最终获得了 326 ps 的 532 nm 输出光和 168 ps 的 355 nm 输出光。

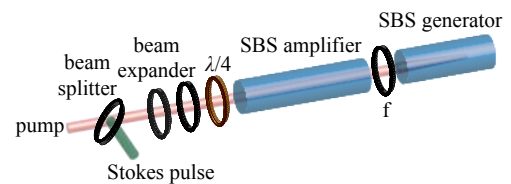


Fig. 3 Schematic diagram of compact double cell structure

图 3 紧凑双池结构原理图

2.3 独立双池脉冲压缩器

独立双池结构由 Fedosejevs 等^[56]在准分子激光脉冲压缩实验中首次提出。独立双池结构可以对产生池和放大池的泵浦光进行独立控制,适用于高能量环境。但系统构成复杂, Stokes 光和泵浦光的准直调整也相对困难。Dane 等^[57]对此结构进行了调整,最终在 2.5 J 的泵浦能量下获得 9 倍的脉冲压缩率。近些年,独立双池系统因其能量可控性得到广泛应用。Yuan 等^[58]在 SBS 增益系数测量实验中采用独立结构,克服了原有测量方法无法通过实验确定电致伸缩/带宽值的缺陷。Feng^[59]研究了亚声子寿命脉冲压缩,采用独立双池结构获得了 170 ps 输出脉冲和 65% 的能量转换效率。此外, Xu^[60]等在两脉冲相互作用动力学的研究中,使用能量可控产生-放大双池结构将 10 ns 压缩到了 1 ns,转换效率达到 75%。Liu^[61-62]利用该结构研究了受激拉曼效应(SRS)对 SBS 压缩的影响及准稳

态 SBS 压缩, 分别获得了 97 ps 和近似 1/10 声子寿命的压缩脉冲。准稳态压缩实验原理如图 4 所示。

3 影响 SBS 脉冲压缩的因素

除了压缩器结构对脉冲压缩特性产生影响之外, 增益介质、泵浦脉冲参数及光学器件参数选取不当也会降低 SBS 压缩性能。介质间布里渊阈值的差别改变了最佳泵浦能量, 进而影响透镜焦距的控制和反应池长度的选择。因此, 在进行 SBS 压缩时应应对整体实验环境做综合考虑。

3.1 增益介质影响

增益介质作为 SBS 能量转换场所, 其结构状态及物理参数对压缩脉冲的宽度和系统效率有重要影响。本节分别对增益介质的选取和两个重要参数进行介绍。

3.1.1 增益介质选取

固体材料具有较强的结构稳定性, 不易受环境影响, 但击穿阈值相对较低, 一旦发生光学损伤不可恢复; 气体介质吸收系数较小, 有利于脉冲压缩, 但对密封和压力要求严格, 需要使用金属盒存储气体介质来研究压力对压缩性能的影响^[63-64]; 液体介质种类丰富, 实验条件要求较低, 具备一定互溶性, 是进行 SBS 脉冲压缩的常用介质^[65-69]。此外还应注意介质的非线性折射率, 防止自聚焦现象的发生^[70]。介质的过滤和提纯液也会提高系统的能量反射率和压缩稳定性^[71]。

(1) 固态增益介质

石英晶体、熔融石英或熔融的二氧化硅因其易获取且操作简单被频繁用于固态介质 SBS 脉冲压缩中。2007 年, Yoshida 等^[72]设计了一种由两个直角棱镜和熔融石英玻璃块组成的紧凑高效的固体压缩结构。在不同波长下, 13~16 ns 激光脉冲可以压缩到 1 ns 甚至更窄。在无光学损伤的情况下, 系统在 1064, 532 和 355 nm 处的反射率分别达到 90%、85% 和 80%。同年, Yoshida 等^[73]用熔融石英作为增益介质, 将波长为 1064 nm 的 13 ns 激光脉冲压缩为 1.2 ns 相位共轭脉冲, 反射率达 95%。2008 年, Marcus 等^[74]使用熔融二氧化硅作为增益介质, 研究发现这种介质可以改善固体介质易击穿的问题。作者在反应池中对种子脉冲进行了两次放大, 最终将 2.5 ns 脉冲压缩到 175 ps。近年, Wang 等^[75]利用熔融石英研究了高重复频率 SBS 压缩特性, 实验装置如图 5 所示。通过与 K8 玻璃比较发现熔融石英的非流动性、高热导性是实现高重复频率压缩的关键。最终在 50 mJ、1 kHz 的入射条件下, 获得了 950 ps 压缩脉冲。

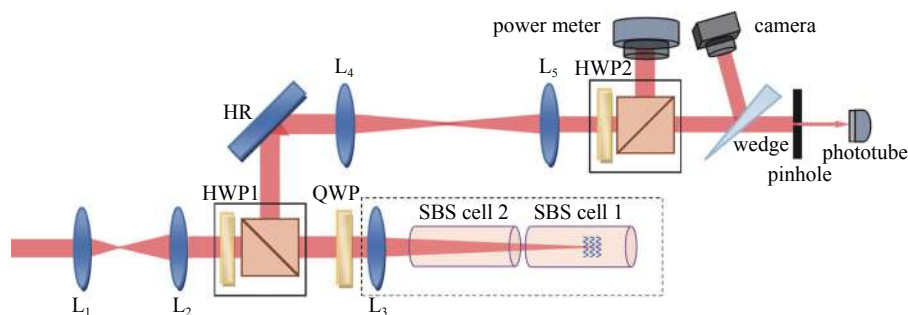


Fig. 5 Experimental set of solid medium SBS pulse compression at high repetition rate^[75]

图 5 高重复频率下固体介质 SBS 压缩实验装置^[75]

(2) 气态增益介质

SBS 脉冲压缩气体增益介质主要包括 SF_6 , Ar, Xe, CH_4 , H_2 , N_2 , CO_2 等。由于气体密度相对较小, 实验过程中需要对气体加压。这不仅增加了实验的难度和危险性, 也影响了最终的实验结果^[76]。Takahashi 等^[77]设计了一种两步 SBS 脉冲压缩产生高强度短脉冲的方法, 如图 6 所示, 选择 SF_6 气体为 SBS 介质, 产生脉冲宽度为 150 ps 的 Stokes 脉冲, 而后通过饱和放大 KrF 激光放大器进一步缩短 Stokes 脉冲。最后得到 54 ps 的 Stokes 脉冲, 脉宽降低至 40%。2006 年, Wang 等^[78]利用 SF_6 介质研究了宽带 KrF 激光泵浦的 SBS 压缩, 总结了介质气压、泵浦功率密度

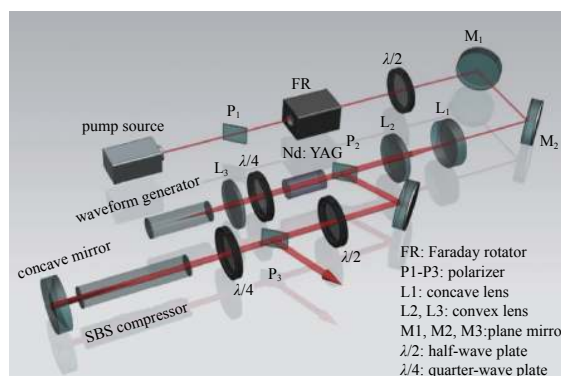


Fig. 4 Schematic diagram of quasi-steady state SBS compression experiment^[62]

图 4 准稳态 SBS 压缩实验原理图^[62]

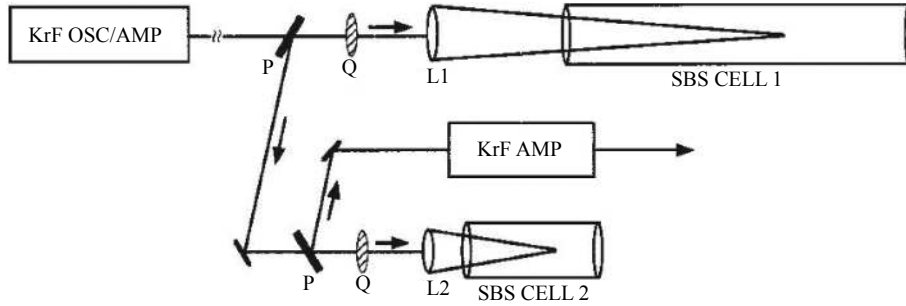


Fig. 6 Schematic diagram of the two-step SBS pulse compression experiment^[77]

图 6 两步 SBS 脉冲压缩实验原理图^[77]

和透镜焦距对压缩反射率的影响。

(3) 液态增益介质

由于固态、气态增益介质对实验条件较为苛刻,实际普及率并不高,目前实验主要以液态物作为介质。常用的液体增益介质有 C_4Cl_6 、丙酮、甲醇等有机化合物,以及水和部分共价氯化物。但研究和使用的最多的是 PFCs 和 PFPE 化合物。2014 年, Zhang 等^[79] 研究了水中 SBS 脉冲的反常压缩,并推测造成这种现象的原因是泵浦脉冲能量的短暂猛烈提升,使得激光脉冲的实际增益长度变短。Dement'ev 等^[80] 利用 Nd: YAG 脉冲和其他宽度约 1 ns 的固态微型激光器,以 CCl_4 为介质,将信号脉冲有效压缩至 70 ps 以下的宽度。实验过程中弛豫时间与相互作用脉冲宽度处于同一量级,可以通过提高种子强度和优化延迟时间来改善能量提取效率。Wang 等^[81] 在两级 SBS 压缩系统中使用 CCl_4 , 获得了比介质声子寿命更小的 60 ps 脉冲。Kuz'min 等^[82] 在高纯度全氟辛烷中实现 16 ns 激光脉冲的 SBS 压缩。能量转移效率达到 50%, 最小 Stokes 脉冲宽度为 0.56 ns。

对于 PFCs 和 PFPE 系列化合物,诸多文献介绍了它们优秀的脉冲压缩性能。Park^[83] 测量了 PFCs 和 PFPE 液体介质的 SBS 反射率和阈值能量,数值计算了 SBS 介质布里渊频移并得到了理论增益系数。Viliam 等^[84] 以 FC-75 作为介质,将 25 J, 25 ns 脉冲压缩到 500 ps, 转换效率达到 88%。2009 年, Yoshida 等^[85] 以 FC-40 液体为介质,设计了双长腔 SBS 压缩,如图 7 所示。脉冲宽度从 13 ns 压缩到 160 ps, 能量反射率超过 80%。

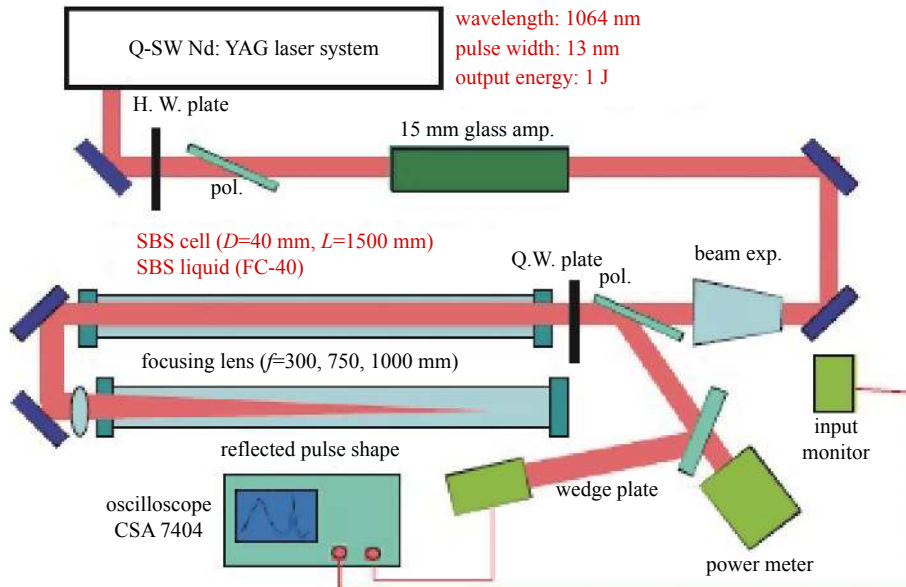


Fig. 7 Optical layout of SBS compression with double-long cavity^[85]

图 7 双长腔 SBS 脉冲压缩光学布局^[85]

Kuwahara 等^[86] 以 FC-72 液体为介质,研究了放电型 KrF 激光放大器对陡前沿 Stokes 脉冲的放大压缩,实现 Stokes 脉冲的上升沿部分宽度缩短为 200 ps。Kmetik 等^[87] 同样利用 FC-72 介质,将一个 10 ns 窄带泵浦脉冲压缩为一个 (0.87 ± 0.04) ns 的 Stokes 脉冲,上升时间为 0.41 ns, 峰值幅值波动水平为 $\pm 10\%$, 脉冲压缩比约为 10, 该装置的总效率达到 87%。文献^[88-89] 使用氟碳化合物 FC-770 与 FC-3283, 将种子脉冲压缩到百 ps, 能量反射率超过 85%。

Guo^[90]详细解释了 PFCs 系列的化学结构,讨论了键能、吸收系数和承载能力之间的关系,提出了一种准确观察击穿现象发生的方法。

实验条件下,产生池介质倾向于具有较高的损伤阈值而放大池介质倾向于具有较小的吸收损耗,混合型介质的出现弥补了单一介质无法兼顾高损伤阈值和低吸收系数的缺陷。Hasi 等^[67]研究了 CCl₄/C₂Cl₄ 混合液作为放大池介质, C₃H₆O 作为产生池介质时在功率负载、能量反射、相位共轭性方面的优势。实验发现,混合介质在低泵浦能量下效果与普通情况类似;当泵浦能量提高时,对应能量反射率更好,如图 8 所示。

3.1.2 增益介质参数

液态介质,特别是 PCFs 与 PFPE 系列化合物,因其具有短声子寿命和高布里渊增益系数,成为近年 SBS 压缩特性试验的理想介质。下面将以上述介质为例,对影响 Stokes 脉宽及能量转换效率的声子寿命和增益介质这两个重要介质参数作简要分析。

(1) 声子寿命

声子寿命与介质的粘性阻尼效应有关,是描述声场衰减过程的物理量,其表达式为^[17]

$$\tau_B = \frac{\rho_0}{4\eta\omega_L^2(n/c)^2} \quad (5)$$

式中: ρ_0 为介质密度; η 为介质运动粘度; ω_L 为泵浦频率。声子寿命代表声场从不稳定振荡中恢复所需的时间(弛豫时间)。较短的声子寿命可以缩短 Stokes 种子和泵浦脉冲的瞬时作用时间,使种子脉冲的上升沿与高强度泵浦脉冲快速耦合,瞬时增益较大;声子寿命过长会导致声场复稳时间延长,两脉冲的瞬时作用时间延长,压缩效果变差。

SBS 压缩基于声场作用下光波场的耦合,声子寿命决定了压缩脉冲宽度的最低限度^[40]。因此声子寿命对 SBS 的压缩特性影响较大。压缩脉冲持续时间为^[56]

$$\tau_s = \frac{2.3\tau_B}{I_p g_B L} \quad (6)$$

式中: τ_B 是声子寿命; I_p 是泵浦脉冲强度; g_B 是布里渊增益系数; L 是相互作用长度。不难看出较低的声子寿命有利于获得较短的脉冲持续时间。Zhong^[91]选择 FC-72, FC-3283, FC-770 和 FC-40 作为介质,研究了不同声子寿命对压缩脉冲宽度的影响,四种介质的声子寿命依次减小。当泵浦能量达到 190 mJ 时,四种介质对应的 Stokes 脉冲宽度分别为 310, 202, 190 和 192 ps,实验装置如图 9 所示。实验结果证明 Stokes 脉冲宽度与声子寿命大小呈现正相关。

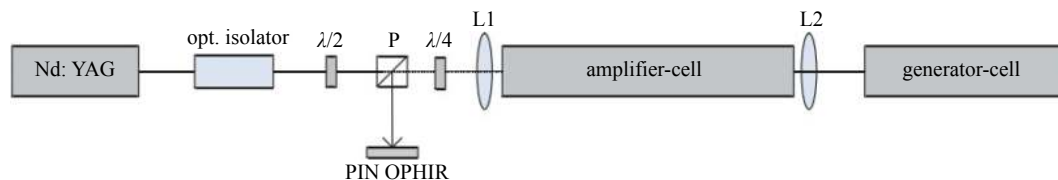


Fig. 9 Optical path of pulse compression experiment based on perfluorocarbon medium^[91]

图 9 基于全氟碳介质的脉冲压缩实验光路^[91]

文献 [92-93] 研究了 FC-72, HT-135 和 FC-40 三种介质在 SBS 瞬态压缩中的性能,结果表明在高泵浦能量条件下,短声子寿命介质可以实现相对较短的脉冲持续时间。通过改变入射能量,观察了不同介质的压缩脉冲宽度和能量转换效率,如图 10 所示。

可见相同泵浦能量下,使用短声子寿命介质可以获得更理想的脉冲宽度和更高的能量转换效率。表 1 总结了常用氟系化合物的参数。

随着深入研究,人们发现脉冲压缩极限并非单纯由声子寿命决定。Feng 等^[44]在进行 FC-72 介质的 SBS 压缩时发现泵浦宽度远远大于声子寿命时,Stokes 脉冲宽度与声子寿命有关;泵浦宽度小于声子寿命时,Stokes 脉冲宽

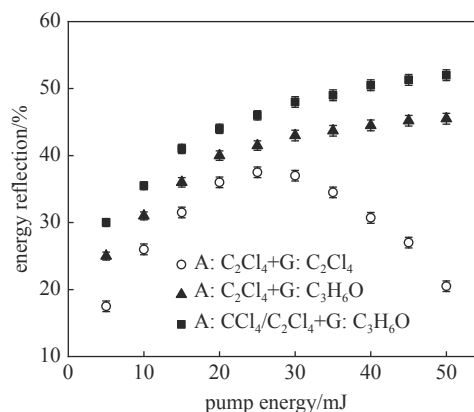


Fig. 8 Relationship between energy reflection and pump energy in the three mixed gain media^[67]

图 8 三种混合增益介质能量反射率与泵浦能量的关系^[67]

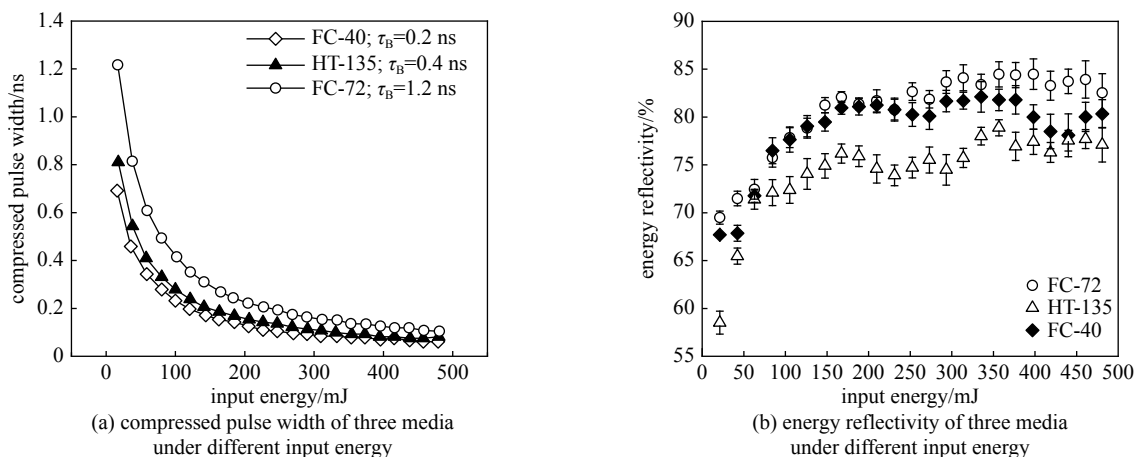

 Fig. 10 Variation of compressed pulse width and energy reflectivity with the increase of input energy^[92-93]

 图 10 压缩脉冲宽度和能量反射率随入射能量增加的变化关系^[92-93]

表 1 常用氟系列化合物的 SBS 参数

Table 1 SBS parameters of fluorine compounds in common use

SBS medium	refractive index	frequency shift /MHz	phonon lifetime /ns	gain coefficient /($\text{cm}\cdot\text{GW}^{-1}$)	reference
FC-40	1.29	1075	0.20	1.8	[94]
FC-43	1.30	3300	0.15	1.3	[58, 95]
FC-70	1.30	2133	0.80	0.2	[58]
FC-72	1.25	1100	1.20	6.0	[43, 96]
FC-770	1.29	1350	0.57	3.5	[40]
FC-3283	1.27	2600	0.59	4.1	[89, 95]
HT-110	1.28	553	0.60	4.7	[97]
HT-135	1.28	1109	0.40	3.0	[92]
HT-270	1.28	8401	0.10	2.3	[97]

度与半周期增益有关。同样, Tomov 等^[98]提出了如果泵浦脉冲宽度比 τ_B 大, 则相互作用受限于声子寿命; 如果泵浦脉冲宽度与 τ_B 处于相同量级, 则相互作用受限于声子半周期持续时间的相似结论。文献 [40] 通过数值模型指出耦合方程中的边界条件决定了最终的压缩结果。如果泵浦信号周期比声子寿命短, 则压缩脉冲宽度可以达到亚声子寿命量级。

(2) 布里渊增益系数

布里渊增益系数 g 的研究通过建立数学模型和曲线模拟方式进行。描述布里渊增益系数的公式为^[17]

$$g_B = \frac{\gamma_e^2 \omega_s^2}{nc^3 \nu \rho \Gamma_\Omega} \quad (7)$$

式中: ω_s 为 Stokes 光频率; ν 为声速; Γ_Ω 为布里渊线宽。布里渊增益系数一方面反映了 SBS 过程中光波场与声场的耦合强度, 另一方面反映了压缩过程的能量反射率。Wang 等^[99]通过改变 SF_6 的压力, 研究了介质增益系数对压缩比的影响, 实验结果如图 11 所示。

由图可知, 随着增益系数增大, 压缩比逐渐减小。为获得大压缩比脉冲, 应选择小增益系数的介质, 但同时会损失一定能量转化率。同样, 文献 [100] 通过数学模拟研究了增益系数对能量反射率的影响。由图 12 可知, 随着增益系数增大, 能量反射率提高, 更多的能量转换到 Stokes 光中。但随着增益系数进一步的提升, 能量反射率趋于饱和, 这是由于泵浦光的有限能量导致的。

3.2 泵浦脉冲影响

泵浦脉冲作为 SBS 的激励源, 其能量、宽度以及形状都会影响压缩特性。泵浦能量一定程度上控制了泵浦脉冲和 Stokes 脉冲的相互作用长度以及其他非线性效应和光学击穿的发生; 泵浦宽度是保证两脉冲能够充分进行能量转换的重要参数; 一个理想泵浦形状可以实现强声场的快速建立, 有利于获得一个高质量、高强度、高稳定性

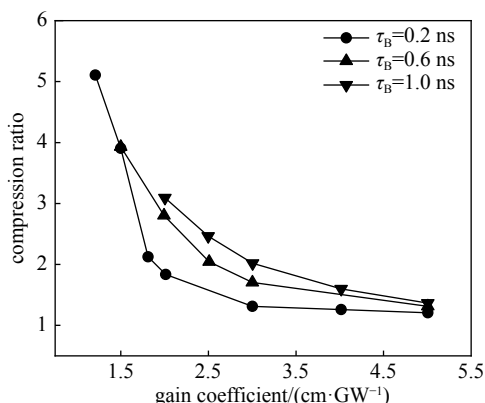


Fig. 11 Relationship between pulse compression ratio and gain coefficient^[99]

图 11 脉冲压缩比与增益系数的关系^[99]

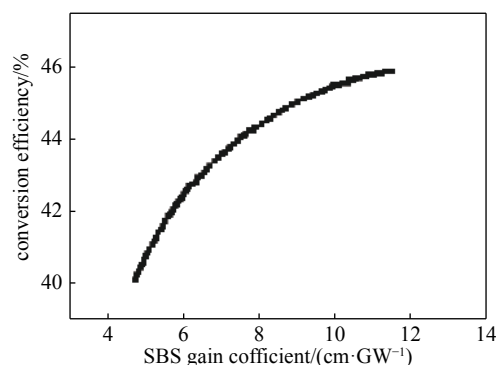


Fig. 12 Relationship between energy conversion efficiency and gain coefficient^[100]

图 12 能量转换效率与增益系数的关系^[100]

的 Stokes 种子。为了保证输出稳定性,应使用脉宽稳定性较好的泵浦光^[101]。

3.2.1 泵浦脉冲能量

泵浦脉冲的能量在压缩过程中起着至关重要的作用,其大小直接影响到 SBS 的产生。能量太小达不到 SBS 阈值无法实现脉冲压缩;能量过高又会产生高阶 Stokes 脉冲以及其他非线性效应,严重的会出现阈值击穿。Feng 等^[41, 59]揭示了泵浦能量与 Stokes 脉宽的关系,如图 13 所示。由图 13(a)可以看出,随着产生池泵浦能量的增加,Stokes 种子宽度逐渐变小。这是两脉冲相互作用增强,使种子上升沿得到有效放大的结果。同时发现图 13(b)中有一个小转折,这是因为泵浦能量过高会使种子脉冲向入射端移动,使其不能与泵浦脉冲有效耦合。当 Stokes 脉冲无法充分提取泵浦能量时,其宽度会逐渐展宽。

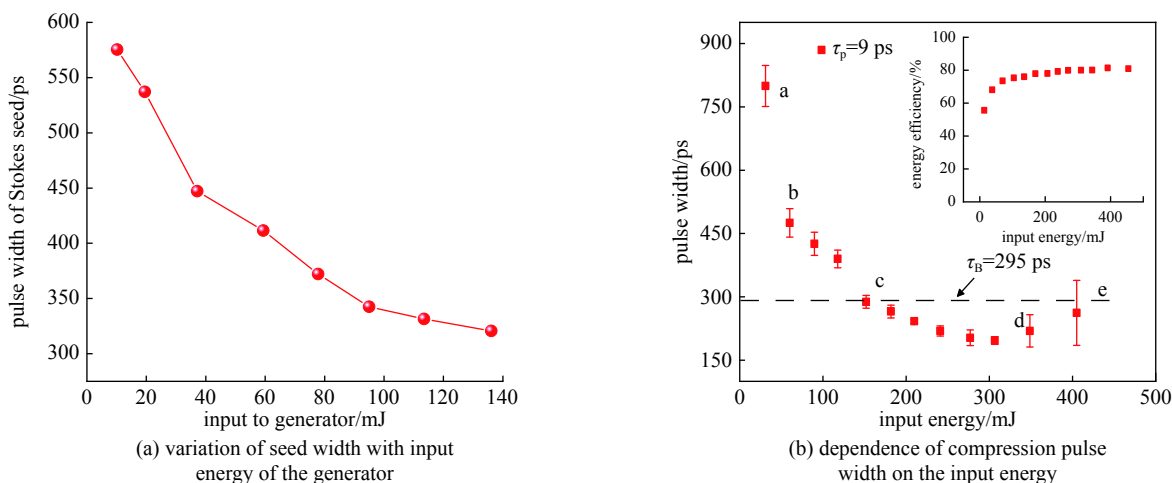


Fig. 13 Pump energy performance^[41, 59]

图 13 泵浦能量影响^[41, 59]

Liu 等^[42]利用衰减片改变入射到产生池中的泵浦能量,研究了无尾部调制的脉冲压缩,衰减依次设置为 0%, 25% 和 50%。图 14 展示了传统能量转换效率与有效能量转换效率随入射能量的变化情况。与传统的能量转换效率的定义相比,新的定义将输出 Stokes 总能量中的尾部调制能量剔除,只剩下单纯的 Stokes 前沿所吸收的能量。图中随着入射能量增加,传统的能量转换效率持续上升直到饱和;而有效能量转换效率会根据衰减度出现不同的变化。这说明入射能量应通过衰减进行动态控制从而适应系统的最佳承载值。

3.2.2 泵浦脉冲宽度

泵浦宽度对 SBS 压缩的影响不如泵浦能量显著。目前在稳态实验中,泵浦宽度一般设置在 10 ns 左右,从而满足声子寿命小于泵浦脉宽的要求。Yuan^[102]通过数值模拟详细介绍了泵浦宽度对压缩过程的影响,模拟中设置的参数如表 2 所示。

图 15 显示了 Stokes 脉宽与泵浦脉宽的关系。由于泵浦光和 Stokes 光束在模拟过程中处于相同峰值功率条件

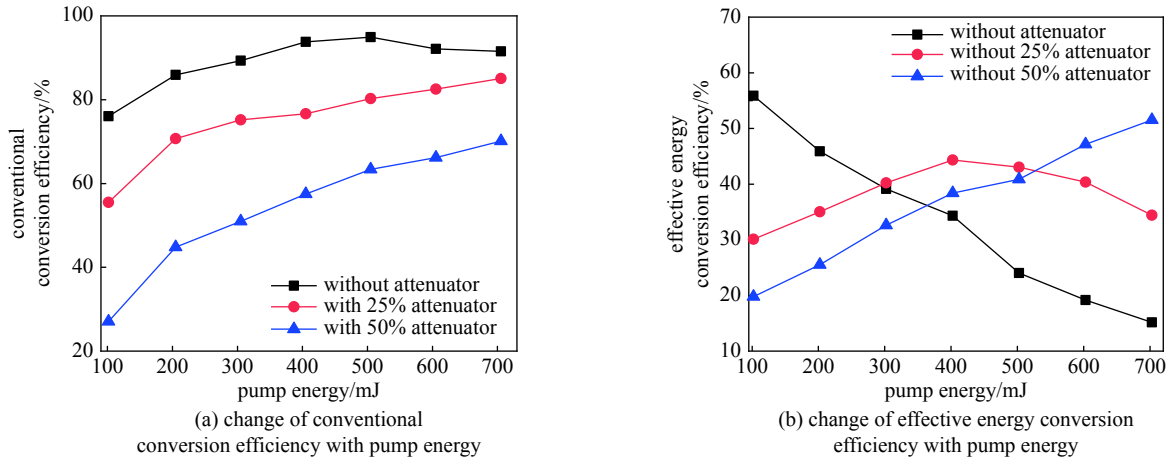


Fig. 14 Relationship between conversion efficiency and pump energy^[42]

图 14 转换效率与泵浦能量的关系^[42]

表 2 泵浦宽度对 SBS 压缩影响数值仿真参数设置

Table 2 Parameter setting of numerical simulation for the influence of pump width on SBS compression

pump power density/(MW·cm ⁻²)	Stokes power density/(MW·cm ⁻²)	gain coefficient/(cm·GW ⁻¹)	phonon lifetime/ns	pump width/ns
500	500	0.18	0.3	2~5

下, 泵浦脉宽的提高使其总能量和总增益得到了提升。最终使种子光上升沿得到更充分压缩。

Wang^[103] 研究了泵浦脉冲宽度对能量反射率的影响, 如图 16 所示。随着泵浦宽度增加, 有效作用距离延长, 能量转换效率提高。但超过最佳作用长度后, 两脉冲的有效作用长度不再增加, SBS 能量反射率保持不变甚至变小。

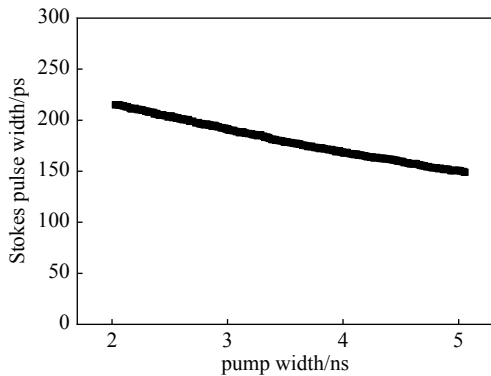


Fig. 15 Relationship between Stokes pulse width and pump width^[102]

图 15 Stokes 脉冲宽度与泵浦宽度的关系^[102]

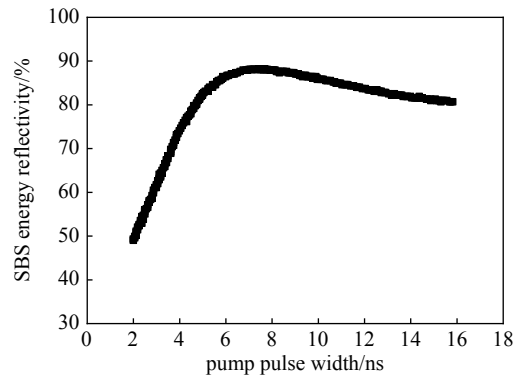


Fig. 16 Change of energy reflectivity with pump pulse width^[103]

图 16 能量反射率随泵浦脉冲宽度的变化^[103]

3.2.3 泵浦脉冲形状

一般情况下, 研究人员选取高斯或高阶高斯型脉冲作为泵浦源。然而为了获得高压缩比和最小脉冲宽度, 时域高斯型的泵浦脉冲和 SBS 阈值设置了两个约束条件: 低功率前沿和不固定的相互作用长度^[40]。为了减轻限制, 探索其他形式的泵浦源作为替代波形是一种可行方案。

由于高斯分布的泵浦脉冲前沿的强度较低, 无法在很短时间内建立起具有足够强度的声场。此外, 高斯型泵浦脉冲的能量绝大部分集中在瑞利区域内, 随着泵浦能量增加, Stokes 分量的产生位置将会前移, 影响了系统的转换效率。因此, 研究人员尝试使用具有陡峭前缘的三角形或阶跃泵浦脉冲来弥补高斯型泵浦的不足, 三种泵浦形状如图 17 所示。研究人员发现泵浦光在进入介质后产生声光栅, 向介质输送足够能量的前沿尖峰将在产生声光栅中起关键作用, 陡前沿的存在可以大幅度缩短了 SBS 过程的声场建立时间^[104-105]。

Liu^[106] 讨论了在新泵浦源条件下, 能量转换效率随泵浦能量增加的具体变化。对于高斯型泵浦, 声子寿命将限制输出脉冲的持续时间, 能量转换效率将随着泵浦能量的增加而达到饱和。三角型泵浦具备一个高能量的陡上

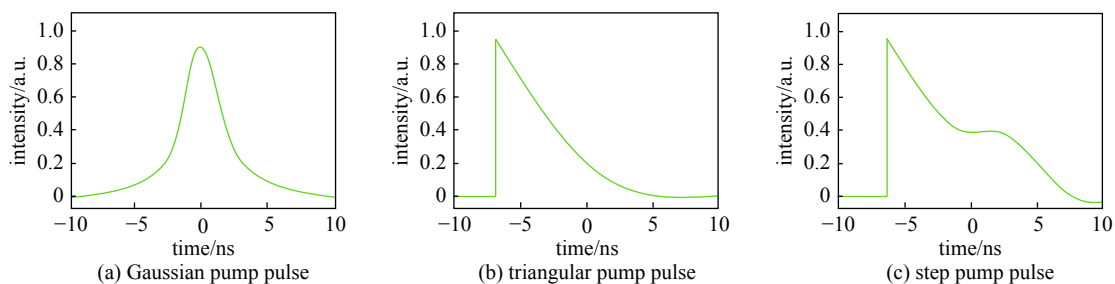


Fig. 17 Pump shape

图 17 泵浦形状

升沿, 因此可以产生一个建立时间更短的强声波场。由于大部分泵浦能量用来产生强声场, 无法提供充足的能量进行能量转换, 因此三角形泵浦的转换效率不高。由于阶跃型泵浦能够在一段时间内保持能量稳定, 因此在产生强声场的同时可以满足 Stokes 脉冲对泵浦能量的抽取需求, 进而能够获得可观的能量转换效率。

3.3 结构参数影响

通常情况下, 泵浦脉冲到达焦点时刚好产生 SBS 效应, 进而与 Stokes 脉冲进行能量交换; 当 Stokes 前沿得到充分放大后, 剩余泵浦能量不足以支撑 SBS 效应产生, Stokes 尾部不会产生“拖尾”现象。事实上, 无论是光路的设计、透镜焦距的选择还是池长的控制, 都会产生泵浦脉冲和 Stokes 脉冲作用的延时, 以及相互作用长度不充分现象。因此, 在实验设计中要充分考虑到系统各部分的参数匹配, 这对实现超短脉冲压缩很重要。

3.3.1 光程影响

Xu 等^[43]研究了如何提高 SBS 脉冲压缩的最大峰值功率限制。作者结合理论和实验, 对泵浦脉冲和种子脉冲的相对延迟和相互作用长度进行了优化。在实际验证中, 两个脉冲的初始作用位置直接影响压缩效果, 如图 18 所示。

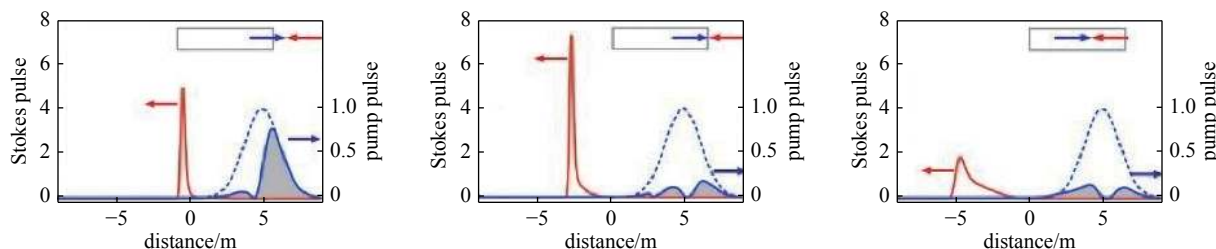


Fig. 18 Compression effect corresponding to the initial action position of pulses^[43]

图 18 脉冲初始作用位置对应的压缩效果^[43]

两脉冲在右边界外相遇时, Stokes 脉冲只和部分泵浦脉冲相遇, 能量提取效率低; 在右边界相遇时, Stokes 脉冲与泵浦脉冲充分作用, 能量转换效率高, 峰值功率高; 在介质内部相遇时, Stokes 脉冲前沿没有充足的时间放大, 大部分泵浦能量被下降沿提取因而出现“拖尾”。实验研究了如何获得两个脉冲的最佳重叠, 经过分析, 除了光程长度的差异 Δt_1 , SBS 产生过程所经历的延迟 Δt_2 也应该被考虑, 即总的延迟 $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$ 。因此, 要找到一个恰当的相互作用长度来避免压缩脉冲的尾部展宽, 同时减少系统的吸收损耗, 保证总体效率。

3.3.2 透镜焦距影响

通过设置聚焦透镜可以提高泵浦光的功率密度, 缩短 SBS 产生时间, 因此控制焦距是实现超短脉冲压缩的重要环节。Wang^[107]研究了泵浦能量为 9.8 mJ, 脉宽为 1.6 ns 时, Stokes 脉宽随透镜焦距变化的规律, 如图 19 所示。

随着焦距增加, 脉冲宽度先是一个剧烈的下降, 之后慢慢恢复平稳。这是因为长焦透镜具有更长的瑞利距离, 增加了两脉冲的相互作用长度。对于一定长度的泵浦脉冲, 泵浦光功率密度越大, 能够维持 SBS 效应的光脉冲时间越长, Stokes 脉冲能够充分与泵浦脉冲相互耦合, 从而使脉冲得到有效压缩。Cheng^[108]认为透镜焦距应设置在合理范围内, 过

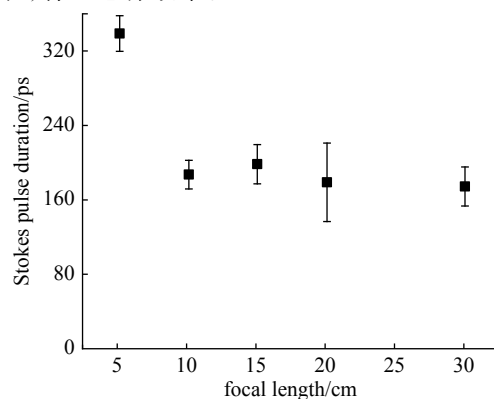


Fig. 19 Variation of Stokes pulse width with focal length of lens^[107]

图 19 Stokes 脉冲宽度随透镜焦距的变化^[107]

短会使有效作用长度不足,造成能量转换效率降低;过长会使光斑直径变大,能量损耗增大亦不能够获得理想压缩脉冲。

3.3.3 池长影响

Li^[109]详细介绍了产生池和放大池长度对系统压缩因子的影响。由图20(a)可以看出,随着产生池长度增加脉冲压缩率先上升后下降。这里引入渡越时间 T_p ,为了获得最好的压缩效果,渡越时间应为泵浦宽度的二分之一。若渡越时间小于泵浦宽度的一半,两脉冲的相互作用不充分,导致Stokes脉宽压缩率下降;若渡越时间过长,泵浦能量除了供Stokes脉冲提取外,还会被增益介质吸收,导致Stokes脉冲展宽。由于渡越时间满足 $T_p \geq 2nL/c$ (L 为池长度),因此应该合理设计产生池长以获得理想渡越时间,提高系统压缩性能。

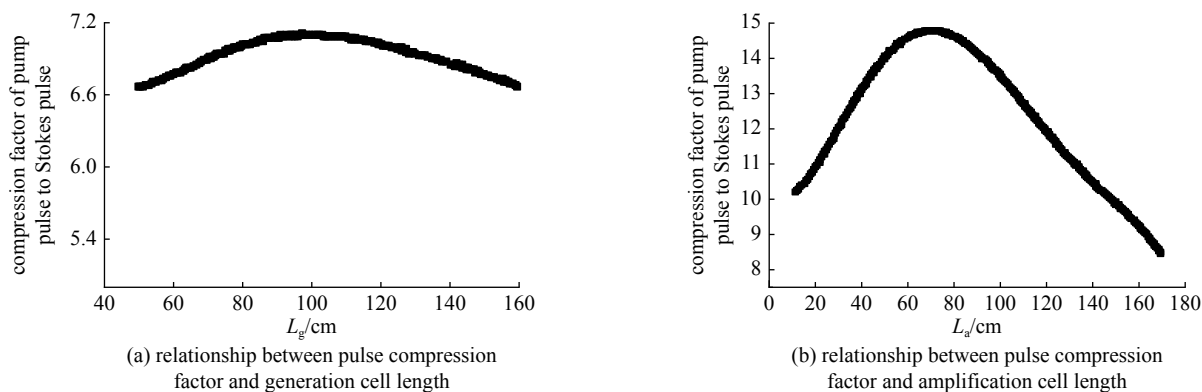


Fig. 20 Effect of cell length^[109]

图20 池长的影响^[109]

由图20(b)可知随着放大池长度的增加,脉冲压缩系数先增大后减小,这是因为种子光与泵浦光的相互作用长度会随着放大池长度的增加而增大,使得种子脉冲被充分放大,最后使得脉冲宽度先减小后增大。当放大池长度能够容纳整个泵浦光时,增加其长度不会进一步提高脉冲压缩系数,甚至影响压缩效果。与图20(a)相比,Stokes压缩系数受放大池长度变化的影响更明显。这说明在双池结构中,放大池是能量转换的主要场所。

SBS脉冲压缩是一种简便的压缩激光脉宽的手段,为了获得稳定性高且光束质量优异的压缩脉冲,设计并控制压缩影响因素尤为重要。综合前文,整体压缩过程会受到压缩器设计结构、增益介质、泵浦脉冲及光学器件搭配等多种因素的共同影响。压缩器结构的设计受其他因素影响较小,具有一定独立性,其主要控制实验环境搭建的复杂度及该环境所能承载的能量峰值。单池压缩器结构简单,但受制于较低的压缩脉冲能量。为适应当下高脉冲能量及高光束质量的需求,多池压缩结构更受青睐,而其搭建及光路的微调则相对困难。一般情况下,泵浦脉冲能量达到阈值门限即可出现SBS效应,而压缩过程是否理想则需要对泵浦能量做进一步调整。能量过低使得系统效率低下,脉宽压缩因子达不到理想值;而过高的能量又会激发高阶Stokes脉冲,产生严重“拖尾”。从压缩系统的保护角度来看,泵浦能量影响了透镜焦距,对光学器件的选择产生影响。此外,增益介质也是实现最优压缩的关键一环。介质声子寿命控制着泵浦脉冲与Stokes脉冲进行能量交换的时间,而介质的增益系数决定了有多少能量能够交换到Stokes脉冲中。实际上同一个介质无法同时满足短声子寿命和高增益系数要求,因此探寻一种性能平衡的增益介质尤为重要。光学器件的选择、摆放与微调最为繁琐。这包括了器件间光程的设计,聚焦透镜焦距的选择还有反应池长度的控制等,它们之间具有非常紧密的联系,相互掣肘。在进行光路安排时需要特别注意器件的间隔,使SBS效应产生于瑞利区内,从而最大程度提高系统压缩效率。在对整体压缩系统进行优化的同时,还应注意到以SBS作为压缩手段的不足。例如光束质量受限于泵浦脉冲重复频率,脉冲宽度受限于增益介质声子寿命等。此外SBS作为一种压缩手段,并非仅为获取高能量的超短脉冲,其声子-光子的转换特性使其具备潜在的信号处理能力,近年来在宽带微波及多通道信息传输等领域也有应用。因此克服SBS压缩在技术上的不足以及探索全新的应用领域并解决实际问题成为SBS压缩研究的热点。

4 脉冲压缩发展趋势

自SBS效应被人们首次发现,基于SBS的脉冲压缩技术的重点就是如何在保证系统稳定性和光束质量的基础上,能够实现更窄的压缩效果。图21展示了SBS及SBS压缩实验的一些重要时间点。

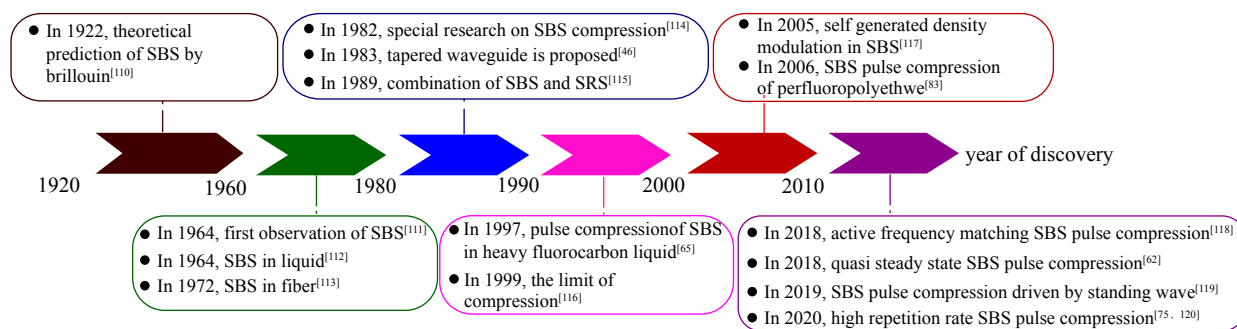


Fig. 21 Timeline of the major advances in SBS pulse compression

图 21 SBS 脉冲压缩主要进展的时间轴

目前, 困扰 SBS 压缩进一步发展的因素主要有泵源重复频率低、压缩系统的能量承载能力有限以及单一压缩方式达到物理瓶颈等问题。一般情况下泵浦脉冲的重复频率在 $1 \sim 100$ Hz, 任何一种输出能量水平都无法探测 cm 级空间碎片。然而泵浦源重复频率的提高导致反应池出现热积累, 最终造成光束质量的严重下降。同时在高重复频率下, 单脉冲能量低, SBS 反射系数不高^[121]。仅提高泵浦能量非但无法获得高能量输出, 反而会产生二阶或高阶 Stokes 分量, 使压缩脉冲出现畸变或展宽现象^[120, 122]; 稳态下 SBS 压缩极限与声子半周期持续时间这一固有属性有关, 且不以实验环境为转移, 因而多手段结合是冲破这一限制的有效方案。本节从实际应用出发介绍了 SBS 压缩在获取高重复频率、超短脉冲过程中技术手段的发展, 同时例举了 SBS 压缩为适应新需求而得到的实际应用。

4.1 高重复频率脉冲压缩

高功率、短脉冲激光在激光雷达^[123]、激光探测^[124]、光参量啁啾脉冲放大(OPCPA)泵浦^[125]、金属材料加工^[126]等方面有着重要的应用。目前, 大多数 SBS 脉冲压缩的泵浦频率被限制在 $1 \sim 10$ Hz。在上述应用中, 采用低重复频率激光器很难使系统获得高精度的反馈, 需要提高重复频率以改善探测分辨率和灵敏度。为了改善高重复频率 SBS 压缩过程中阈值击穿和热积累效应所带来的光束质量和系统稳定性下降的问题, 人们设计了相位共轭镜和旋转偏镜结构并研究了适用于高重复频率环境的增益介质, 如:

2018 年, Kang 等^[127]设计了一种封闭型 SBS 共轭镜 (SBS-PCM), 通过密闭的 SBS-PCM 制备, 将其内部杂质微粒的尺寸控制在 40 nm 以下。系统在 500 Hz 的重复频率下未出现光击穿现象或热效应。在单偏振输出中, 脉冲总能量为 1.1 J, 光束质量 M^2 达到 2.0。在最大输出功率下, 脉冲宽度压缩到 10 ns, 峰值功率上升到 110 MW 以上。

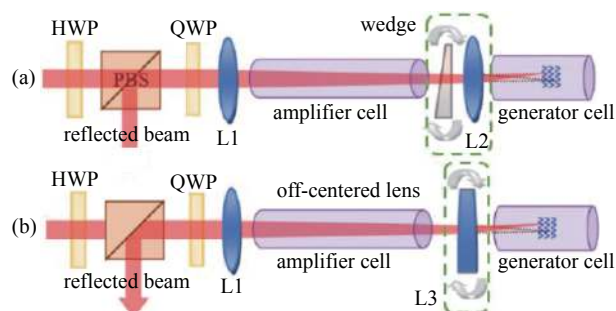
2019 年, Wang 等^[120]设计了一种旋转偏心透镜来改变泵浦脉冲在产生池中的聚焦位置, 代替了楔形块与普通透镜组合的传统方式。两种方法的光学布局如图 22 所示。

实验证明在重复频率为 1 kHz 时, 偏转离心透镜可以补偿大部分由热效应和其他非线性效应引起的光束畸变, 光斑轮廓如图 23 所示。

同年, Wang 等^[97]发现产生池中由于反离心镜产生的热效应以及放大池中的自离焦、热对流效应等是限制高重复频率 SBS 脉冲压缩的主要因素。通过比较 HT-110 和 HT-270 两种不同粘度系数的 SBS 液体介质的束流分布, 发现在高粘度系数的 HT-270 介质中没有明显的热对流和散射现象。最终在 1 kHz 重复频率下, 以 50 mJ 的泵浦能量获得了 820 ps 的压缩脉冲, 能量效率为 52.2%。

4.2 多种压缩技术的结合

单一的 SBS 压缩受到声子寿命及结构影响, 难以突破超短脉冲压缩的极限。因此, 将 SBS 压缩技术与其他脉宽压缩手段结合, 是获得超短脉冲的有效方案。传统串联手段有 SBS 与 SRS 结合或 SBS 与饱和增益开关结合。

Fig. 22 SBS compressor optical path layout: (a) rotating wedge and focusing lens; (b) rotating off-centered lens^[120]图 22 SBS 压缩器光路布局: (a) 旋转楔形和聚焦透镜; (b) 旋转偏心透镜^[120]

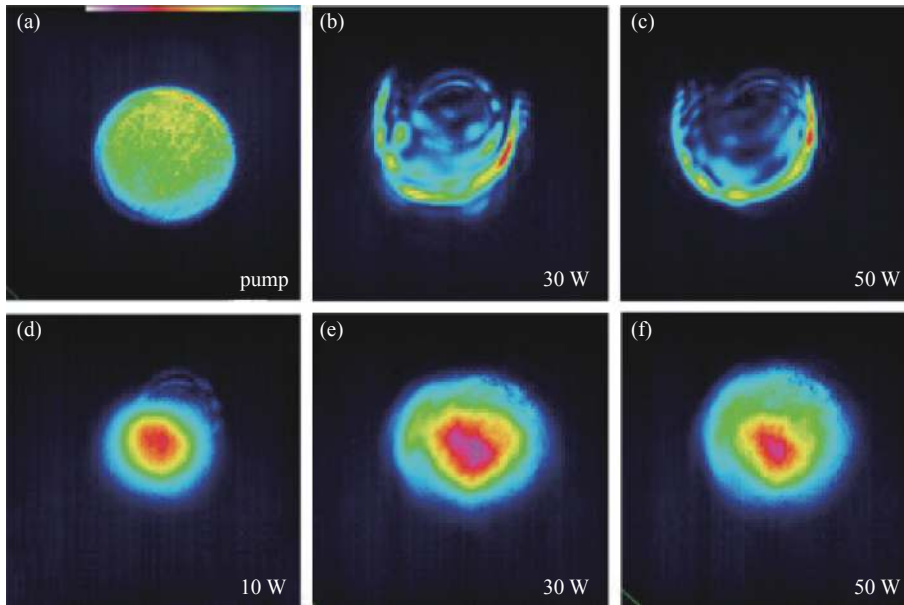


Fig. 23 Beam profile under different pump energy: (a) pump beam; (b, c) without rotating off-centered lens; (d, e, f) with rotating off-centered lens^[120]

图 23 不同能量下光束轮廓: (a) 泵浦光束; (b, c) 无偏转离心透镜; (d, e, f) 有偏转离心透镜^[120]

然而高功率条件下的 SBS 与 SRS 串联压缩会出现高阶 Stokes 光, 不利于能量的转换。同样, SBS 与饱和增益开关结合一般只适用于气体激光器中。

目前, 应用较为广泛的串联手段是 SBS 与 LIB 结合。这种方式通过等离子体吸收、散射脉冲下降沿能量, 从而直接获得一个脉冲的陡下降沿。Bourne 等^[128] 利用窄线宽的 XeCl 振荡放大器, 结合 SBS 和光击穿, 产生了宽度小于 100 ps 的脉冲。Zhang 等^[129] 采用激光诱导等离子体快门技术, 实现了 1.5~11 ns 的脉宽可调节输出。Hasi^[130] 对 SBS 和 LIB 串行压缩进行了实验分析。首先, 采用 FC-72 作为介质, 将泵浦脉冲从 12 ns 压缩到 6 ns。然后将压缩脉冲注入具有较低阈值的 HT-270 增益介质中, 利用阈值击穿过程散射的等离子体, 对压缩脉冲后沿的能量进行提取, 最终获得了宽度为 2 ns 的脉冲。Liu 等^[54] 结合 SBS 产生的陡前沿脉冲和 LIB 对后沿的截取, 将泵浦脉冲从 8 ns 压缩到 170 ps, 最终获得了一个前沿和后沿都具有尖锐陡度的超短高强度激光脉冲, 实验光路如图 24 所示。

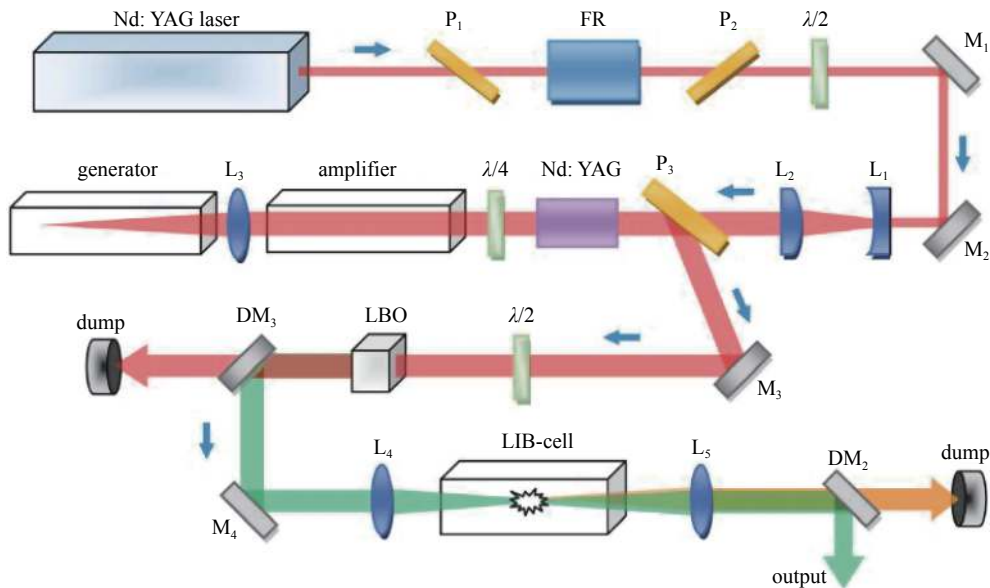


Fig. 24 Pulse compression experimental setup based on the combination of SBS and LIB^[54]

图 24 基于 SBS 和 LIB 组合的脉冲压缩实验装置^[54]

4.3 宽频带微波信号压缩

为提高探测范围与探测精确度, 现代相干雷达会利用超大带宽的超高频信号, 而此微波信号的宽频带和长脉

冲持续时间所带来的数字化信号的巨大比特率,使得数字信号的模数转换(ADC)、数字存储和信号处理都面临着严峻挑战。研究人员将携带有微波信号的泵浦光在光纤中进行SBS压缩,通过检测有无SBS的探测脉冲来实现脉冲压缩。这种方式的处理时间短,大大降低了数字存储和信号处理时间。Long^[131-132]等以标准单模光纤(SMF)为载体,将探测到的带SBS和不带SBS的探测脉冲进行相减,实现宽带微波信号的全光脉冲压缩。成功实现了载波频率为4.3 GHz、扫频范围为1 GHz的线性调频微波信号的脉冲压缩,宽带微波信号压缩后的信号分辨率约为0.88 ns。Ji等^[133]通过引入布里渊增益系数更大的色散补偿光纤(DCF),明显提高了系统信噪比(SNR)。实验结果表明,压缩后的信号具有较好的SNR,系统带宽可扩展到5 GHz。

4.4 光子-声子信号转换

近年来,基于轨道角动量(OAM)复用技术的通信技术已经取得了一些突破性的成果,与此同时OAM复用带来的数据密度的快速增长又对信号处理层提出了巨大的挑战,而光子-声子转换的信号处理电路为解决OAM复用所带来的信号处理难题提供了解决方案。研究人员发现特定的OAM态可以通过布里渊光子-声子耦合在光子和声子域之间实现灵活可控的相互转换,其中OAM和自旋角动量独立守恒。Chen等^[134]利用光整形扩散器将涡旋泵浦光转变为散斑光束,每个属于散斑模式的基本光学涡旋发出具有双倍拓扑电荷的声涡旋波,最终实现了OAM守恒,而脉冲宽度由10.6 ns压缩至4.5 ns。文献^[135-136]同样认为SBS压缩可以应用在OAM复用的大容量通信系统中,利用OAM多路复用扩展基于光子-声子转换的信号处理方案具备应用潜力。

5 结 论

SBS脉冲压缩技术因其原理和系统构成简单且具备理想的能量转换效率和压缩比,成为获得高能量、亚纳秒量级脉冲的重要手段。此外,SBS的高共轭保真度可以有效补偿脉冲相位畸变,提高系统的光束质量。本文对SBS压缩器的优化、增益介质的选取、泵浦脉冲的控制及光学元件参数的配置等可能会影响最终压缩效果的因素进行了综合讨论。

目前,常用SBS增益介质以PFCs和PFPE系列化合物为主。尽管其具备高击穿阈值和低吸收系数,然而此类介质的有毒性及高昂的价格一定程度上限制了SBS脉冲压缩研究的广泛开展。针对SBS瞬态压缩,此类介质的增益($< 10 \text{ cm} \cdot \text{GW}^{-1}$)也不足以保证系统在获得超短脉冲的同时能够维持高工作效率。因此,具有高增益系数($79 \text{ cm} \cdot \text{GW}^{-1} \pm 12 \text{ cm} \cdot \text{GW}^{-1}$)的金刚石材料有望成为后续SBS压缩研究的理想介质。大能量、高重复频率的SBS压缩受到自离焦及热对流效应的干扰,严重影响了压缩脉冲的光束质量。为此,人们提出利用相位共轭镜或偏转离心镜来补偿。近年来,通过主动频率匹配的非共线放大来实现高能量的脉冲压缩亦成为理想设计方案。

总体看来,SBS脉冲压缩技术在增益介质和压缩方案方面还有很大的研究空间。全新的晶体合成工艺为SBS压缩提供了更广泛的介质选择,如金刚石等新兴材料的涌现;同时新颖的压缩手段也为SBS压缩试验的展开提供了更多方案。因此,SBS脉冲压缩有望应用到更广阔的领域中。

参考文献:

- [1] 张昀. 基于SBS脉冲压缩产生百皮秒脉冲及尾部调制抑制的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 9. (Zhang Yun. Investigation on obtaining a hundreds ps pulse and suppressing its tail modulations based on SBS pulse compression[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 9)
- [2] 徐涛, 尚万里, 魏惠月, 等. 基于神光III原型装置的冲击点火分解实验[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 052002. (Xu Tao, Shang Wanli, Wei Huiyue, et al. Resolvability experiments of shock ignition implemented on Shenguang III prototype laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 052002)
- [3] Perkins L J, Betti R, LaFortune K N, et al. Shock ignition: a new approach to high gain inertial confinement fusion on the National Ignition Facility[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103: 045004.
- [4] Betti R, Zhou C D, Anderson K S, et al. Shock ignition of thermonuclear fuel with high areal density[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98: 155001.
- [5] Quinlan F, Gee S, Ozharar S, et al. Ultralow-jitter and -amplitude-noise semiconductor-based actively mode-locked laser[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(19): 2870-2872.
- [6] Yang Shiquan, Ponomarev E A, Bao Xiaoyi. 40-GHz transform-limited pulse generation from FM oscillation fiber laser with external cavity chirp compensation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(7): 1631-1633.
- [7] 曹文华, 刘颂豪, 廖常俊, 等. 单模光纤中皮秒啁啾脉冲压缩[J]. *光学学报*, 1995, 15(2): 180-185. (Cao Wenhua, Liu Songhao, Liao Changjun, et al. Picosecond chirped pulse compression in single-mode fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(2): 180-185)
- [8] 曹文华, 张有为, 刘颂豪, 等. 光纤正常色散区基于脉冲对交叉相位调制的亮脉冲压缩[J]. *物理学报*, 1997, 46(5): 919-928. (Cao Wenhua, Zhang Youwei, Liu Songhao, et al. Compression of bright optical pulse by pulse pair in the normal-dispersion regime of single-mode fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 1997, 46(5): 919-928)

- [9] 曹文华, 刘颂豪, 廖常俊, 等. 单模光纤中基于暗孤子交叉相位调制的亮脉冲压缩[J]. *光学学报*, 1995, 15(3): 281-286. (Cao Wenhua, Liu Songhao, Liao Changjun, et al. Compression of bright optical pulses by dark solitons in the normal dispersion region of single-mode fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, 15(3): 281-286)
- [10] Kibler B, Fischer R, Lacourt P A, et al. Optimised one-step compression of femtosecond fibre laser soliton pulses around 1550 nm to below 30 fs in highly nonlinear fibre[J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(17): 915-916.
- [11] Kibler B, Billet C, Lacourt P A, et al. All-fiber source of 20-fs pulses at 1550 nm using two-stage linear-nonlinear compression of parabolic similaritons[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(17): 1831-1833.
- [12] Ma Yuanyuan, Hou Shanglin, Wang Daobin, et al. Effects of power and shape of pump light on pulse compression based on stimulated Brillouin Scattering[C]//Progress in Electromagnetics Research Symposium-Spring. St. Petersburg, Russia, IEEE, 2018: 1765-1767.
- [13] 王天齐. 基于SBS的逆阶梯脉冲产生技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 1. (Wang Tianqi. Research on the generation of downward step pulse based on SBS[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 1)
- [14] Lu Zhiwei, Gao Wei, He Weiming, et al. High amplification and low noise achieved by a double-stage non-collinear Brillouin amplifier[J]. *Optics Express*, 2009, 17(13): 10675-10680.
- [15] Gao Wei, Hu Xiaobo, Sun Di, et al. Simultaneous generation and Brillouin amplification of a dark hollow beam with a liquid-core optical fiber[J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20715-20720.
- [16] Bel'dyugin I M, Efimkov V F, Mikhailov S I, et al. Amplification of weak Stokes signals in the transient regime of stimulated Brillouin scattering[J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2005, 26(1): 1-12.
- [17] 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.
- [18] Zhang Pingping, Hu Shuling, Chen Shuying, et al. A high-efficiency Brillouin fiber ring laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(6): 495-497.
- [19] 孟洲, 陈默, 陈伟, 等. 光纤传感中的受激布里渊散射效应[J]. *应用科学学报*, 2018, 36(1): 20-40. (Meng Zhou, Chen Mo, Chen Wei, et al. Stimulated Brillouin scattering in optical fiber sensing systems[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2018, 36(1): 20-40)
- [20] Wang Shuangyi, Lu Zhiwei, Lin Dianyong, et al. Investigation of serial coherent laser beam combination based on Brillouin amplification[J]. *Laser and Particle Beams*, 2007, 25(1): 79-83.
- [21] Wang Y L, Lü Z W, Wang S Y, 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.
- [22] Guo Qi, Lu Zhiwei, Wang Yulei. Highly efficient Brillouin amplification of strong Stokes seed[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96: 221107.
- [23] Galindez-Jamioy C A, López-Higuera J M. Brillouin distributed fiber sensors: an overview and applications[J]. *Journal of Sensors*, 2012, 2012: 204121.
- [24] Xu Jinlong, Dong Yongkang, Zhang Zhaohui, et al. Full scale strain monitoring of a suspension bridge using high performance distributed fiber optic sensors[J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27: 124017.
- [25] Dong Yongkang, Chen Liang, Bao Xiaoyi. Time-division multiplexing-based BOTDA over 100 km sensing length[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(2): 277-279.
- [26] Hill K O, Kawasaki B S, Johnson D C. CW Brillouin laser[J]. *Applied Physics Letters*, 1976, 28(10): 608-609.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Meng Hui, Eichler H J. Nd: YAG laser with a phase-conjugating mirror based on stimulated Brillouin scattering in SF₆ gas[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(8): 569-571.
- [30] Song K Y, Abedin K S, Hotate K, et al. Highly efficient Brillouin slow and fast light using As₂Se₃ chalcogenide fiber[J]. *Optics Express*, 2006, 14(13): 5860-5865.
- [31] Liu Jianguo, Cheng T H, Yeo Y K, et al. Stimulate Brillouin scattering based broadband tunable slow-light conversion in a highly nonlinear photonic crystal fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(10): 1279-1285.
- [32] Cheng Tonglei, Cherif R, Liao Meisong, et al. Stimulated Brillouin scattering of higher-order acoustic modes in four-core tellurite microstructured optical fiber[J]. *Applied Physics Express*, 2012, 5: 102501.
- [33] 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.
- [34] Andreev N F, Palashov O V, Pasmanik G A, et al. Four-channel pulse-periodic Nd: YAG laser with diffraction-limited output radiation[J]. *Quantum Electronics*, 1997, 27(7): 565-569.
- [35] Scott A M, Ridley K D. A review of Brillouin-enhanced four-wave mixing[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25(3): 438-459.
- [36] Liu Hongxin, Li Yongliang, Yang Chao, et al. 1.35 ns SBS laser pulse[J]. *Optik*, 2019, 184: 394-398.
- [37] Bai Zhenxu, Wang Yulei, Lu Zhiwei, et al. High compact, high quality single longitudinal mode hundred picoseconds laser based on stimulated Brillouin scattering pulse compression[J]. *Applied Sciences*, 2016, 6: 29.
- [38] 刘莉, 吕志伟, 何伟明, 等. 高功率激光器上的SBS脉冲压缩[J]. *激光杂志*, 2000, 21(2): 10-12. (Liu Li, Lü Zhiwei, He Weiming, et al. SBS pulse

- compression on high-power laser[J]. *Laser Journal*, 2000, 21(2): 10-12)
- [39] 张祎. 高能激光抽运的受激布里渊散射相位共轭镜特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 17-20. (Zhang Yi. Investigation on the SBS phase conjugation mirror character of high energy laser pump[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 17-20)
- [40] Yuan Hang, Wang Yulei, Lu Zhiwei, et al. Fluctuation initiation of Stokes signal and its effect on stimulated Brillouin scattering pulse compression[J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14378-14388.
- [41] Feng Chengyong, Xu Xiaozhen, Diels J C. Generation of 300 ps laser pulse with 1.2 J energy by stimulated Brillouin scattering in water at 532 nm[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(12): 3367-3370.
- [42] Liu Zhaohong, Wang Yulei, Wang Yirui, et al. Generation of high-energy 284 ps laser pulse without tail modulation by stimulated Brillouin scattering[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14: 091901.
- [43] Xu Xiaozhen, Feng Chengyong, Diels J C. Optimizing sub-ns pulse compression for high energy application[J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13904-13915.
- [44] Feng Chengyong, Xu Xiaozhen, Diels J C. High-energy sub-phonon lifetime pulse compression by stimulated Brillouin scattering in liquids[J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12421-12434.
- [45] Yuan Hang, Wang Yulei, Lü Zhiwei, et al. Theoretical investigation on 200 ps laser pulses amplification based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36: 0914003.
- [46] Damzen M J, Hutchinson H. Laser pulse compression by stimulated Brillouin scattering in tapered waveguides[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1983, 19(1): 7-14.
- [47] Hon D T. Pulse compression by stimulated Brillouin scattering[J]. *Optics Letters*, 1980, 5(12): 516-518.
- [48] Davydov M A, Shipilov K F, Shmaonov T A. Formation of highly compressed stimulated Brillouin scattering pulses in liquids[J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1986, 16(10): 1402-1403.
- [49] Neshev D, Velchev I, Majewski W A, et al. SBS pulse compression to 200 ps in a compact single-cell setup[J]. *Applied Physics B*, 1999, 68(4): 671-675.
- [50] 郭琦, 吕志伟, 朱成禹. 双级受激布里渊散射压缩获得高质量窄脉冲波形[J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(2): 265-269. (Guo Qi, Lü Zhiwei, Zhu Chengyu. High-quality pulse shape realized in two-step stimulated Brillouin scattering pulse compression system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(2): 265-269)
- [51] Mitra A, Yoshida H, Fujita H, et al. Sub nanosecond pulse generation by stimulated Brillouin scattering using FC-75 in an integrated setup with laser energy up to 1.5 J[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, 45(3R): 1607-1611.
- [52] Bai Zhenxu, Wang Yulei, Lü Zhiwei, et al. Efficient KDP frequency doubling SBS pulse compressed 532 nm hundred picosecond laser[J]. *Optik*, 2016, 127(20): 9201-9205.
- [53] Schiemann S, Ubachs W, Hogervorst W. Efficient temporal compression of coherent nanosecond pulses in a compact SBS generator-amplifier setup[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, 33(3): 358-366.
- [54] Liu Zhaohong, Wang Yulei, Wang Hongli, et al. Pulse temporal compression by two-stage stimulated Brillouin scattering and laser-induced breakdown[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110: 241108.
- [55] Bai Zhenxu, Wang Yulei, Lu Zhiwei, et al. Demonstration of an ultraviolet stimulated Brillouin scattering pulse compressed hundred picosecond laser in LiB₃O₅ crystals[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19: 085502.
- [56] Fedosejevs R, Offenberger A. Subnanosecond pulses from a KrF laser pumped SF₆ Brillouin amplifier[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 21(10): 1558-1562.
- [57] Dane C B, Neuman W A, Hackel L A. High-energy SBS pulse compression[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, 30(8): 1907-1915.
- [58] Yuan Hang, Wang Yulei, Lü Zhiwei, et al. Measurement of Brillouin gain coefficient in fluorocarbon liquid[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(4): 041902.
- [59] Feng Chengyong, Xu Xiaozhen, Diels J C. Multi-joule, sub-200ps laser pulse generation via SBS sub-phonon lifetime pulse compression[C]//Proceedings of 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics. San Jose, California: IEEE, 2017: 1-2.
- [60] Xu Xiaozhen, Feng Chengyong, Diels J C. High energy pulse compression through two-pulse interaction mediated by stimulated Brillouin scattering in liquid fluorocarbon[C]//Proceedings of CLEO: 2013. San Jose, California: IEEE, 2013: 1-2.
- [61] Liu Zhaohong, Wang Yulei, Zhang Hengkang, et al. A 97-ps laser-pulse generation by two-stage stimulated Brillouin and Raman scattering[C]//Proceedings of 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics. San Jose, California: IEEE, 2017: 1-2.
- [62] Liu Zhaohong, Wang Yulei, Bai Zhenxu, et al. Pulse compression to one-tenth of phonon lifetime using quasi-steady-state stimulated Brillouin scattering[J]. *Optics Express*, 2018, 26(18): 23051-23060.
- [63] Bai Zhenxu, Wang Yulei, Lü Zhiwei, et al. Research progress of serial laser beam combination based on stimulated Brillouin amplification[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52: 110004.
- [64] Zhu Xuehua, Lü Zhiwei, Wang Yulei. High stability, single frequency, 300 mJ, 130 ps laser pulse generation based on stimulated Brillouin scattering pulse compression[J]. *Laser and Particle Beams*, 2014, 33(1): 11-15.
- [65] Yoshida H, Kmetik V, Fujita H, et al. Heavy fluorocarbon liquids for a phase-conjugated stimulated Brillouin scattering mirror[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(16): 3739-3730.
- [66] 哈斯乌力吉, 李杏, 郭翔宇, 等. 受激布里渊散射介质——全氟聚醚的温度特性研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(12): 8554-8558. (Hasi Wuliji, Li Xing, Guo Xiangyu, et al. Investigation on stimulated Brillouin scattering medium—perfluoropolyether at high and low temperatures[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010,

- 59(12): 8554-8558)
- [67] Hasi Wuliji, Lü Zhiwei, Li Qiang, et al. Study on two-cell stimulated Brillouin scattering system with mixture medium[J]. *Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2007, 50(2): 144-151.
- [68] 哈斯乌力吉, 吕志伟, 刘述杰, 等. 混合介质的SBS参数随混合比变化的研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(5): 2976-2980. (Hasi Wuliji, Lü Zhiwei, Liu Shujie, et al. Study on variations of stimulated Brillouin scattering parameters of mixed media with mixing ratio[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(5): 2976-2980)
- [69] 哈斯乌力吉, 李杏, 郭翔宇, 等. 选用混合介质优化介质和控制受激布里渊散射特性的研究[J]. *物理学报*, 2011, 60: 034208. (Hasi Wuliji, Li Xing, Guo Xiangyu, et al. Optimization of medium and control characteristics of stimulated Brillouin scattering based on mixed media[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60: 034208)
- [70] Yuan Hang, Wang Yulei, Lü Zhiwei, et al. Small-scale self-focusing of 200 ps laser pulses in Brillouin amplification[J]. *Chinese Physics B*, 2015, 24: 094210.
- [71] Hasi Wuliji, Lü Zhiwei, He Weiming, et al. Experimental investigation on the improvement of SBS characteristics by purifying the mediums[J]. *Chinese Optics Letters*, 2004, 2(12): 718-721.
- [72] Yoshida H, Fujita H, Nakatsuka M, et al. Temporal compression by stimulated Brillouin scattering of Q-switched pulse with fused-quartz and fused-silica glass from 1064 nm to 266 nm wavelength[J]. *Laser and Particle Beams*, 2007, 25(3): 481-488.
- [73] Yoshida H, Fujita H, Nakatsuka M, et al. Compact temporal-pulse-compressor used in fused-silica glass at 1064 nm wavelength[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2007, 46(1L): L80-L82.
- [74] Marcus G, Pearl S, Pasmann G. Stimulated Brillouin scattering pulse compression to 175 ps in a fused quartz at 1064 nm[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103: 103105.
- [75] Wang Hongli, Cha S, Wang Yulei, et al. SBS pulse compression using bulk fused silica by diode-pumped solid-state lasers at 1 kHz repetition rate[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 128: 106258.
- [76] 刘泓鑫, 李永亮, 顾小琨, 等. 基于SBS超短脉冲激光器的介质研究[J]. *激光与红外*, 2019, 49(4): 387-394. (Liu Hongxin, Li Yongliang, Gu Xiaokun, et al. Research on medium for ultrashort pulse laser by SBS[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(4): 387-394)
- [77] Kuwahara K, Takahashi E, Matsumoto Y, et al. Short-pulse generation by saturated KrF laser amplification of a steep Stokes pulse produced by two-step stimulated Brillouin scattering[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2000, 17(11): 1943-1947.
- [78] 王晓慧, 吕志伟, 林殿阳, 等. 宽带KrF激光抽运的受激布里渊散射反射率研究[J]. *物理学报*, 2006, 55(3): 1224-1230. (Wang Xiaohui, Lü Zhiwei, Lin Dianyang, et al. Stimulated Brillouin scattering reflection pumped by broadband KrF laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(3): 1224-1230)
- [79] 张磊, 李金增. 水中受激布里渊散射脉冲的反常压缩[J]. *物理学报*, 2014, 63: 054202. (Zhang Lei, Li Jinzeng. An unusual pulse compression of stimulated Brillouin scattering in water[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 054202)
- [80] Dement'ev A S, Demin I, Murauskas E, et al. Compression of pulses during their amplification in the field of a focused counterpropagating pump pulse of the same frequency and width in media with electrostriction nonlinearity[J]. *Quantum Electronics*, 2011, 41(2): 153-159.
- [81] 王超, 吕志伟, 何伟明. 利用受激布里渊散射获得皮秒激光脉冲[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(12): 1184-1186. (Wang Chao, Lü Zhiwei, He Weiming. Picosecond pulse generation by stimulated Brillouin scattering compressor[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(12): 1184-1186)
- [82] Kuz'min A A, Kulagin O V, Rodchenkov V I. Formation of nanosecond SBS-compressed pulses for pumping an ultra-high power parametric amplifier[J]. *Quantum Electronics*, 2018, 48(4): 344-350.
- [83] Park H, Lim C, Yoshida H, et al. Measurement of stimulated Brillouin scattering characteristics in heavy fluorocarbon liquids and perfluoropolyether liquids[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, 45(6R): 5073-5075.
- [84] Kmetik V, Kanabe T, Fujita H. Optical absorption in fluorocarbon liquids for the high energy stimulated Brillouin scattering phase conjugation and compression[J]. *The Review of Laser Engineering*, 1998, 26(4): 322-327.
- [85] Yoshida H, Hatae T, Fujita H, et al. A high-energy 160-ps pulse generation by stimulated Brillouin scattering from heavy fluorocarbon liquid at 1064 nm wavelength[J]. *Optics Express*, 2009, 17(16): 13654-13662.
- [86] Kuwahara K, Takahashi E, Matsumoto Y, et al. High-intensity pulse generation by saturated amplification of Stokes pulse with steep leading edge[C]//Proceedings of SPIE 4424, ECLIM 2000: 26th European Conference on Laser Interaction with Matter. Prague, Czech Republic: SPIE, 2000.
- [87] Kmetik V, Fiedorowicz H, Andreev A A, et al. Reliable stimulated Brillouin scattering compression of Nd: YAG laser pulses with liquid fluorocarbon for long-time operation at 10 Hz[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(30): 7085-7090.
- [88] Hasi W L J, Qiao Z, Cheng S X, et al. Characteristics of SBS hundreds picosecond pulse compression and influence of energy on pulse stability in FC-770[J]. *Optics Communications*, 2013, 311: 375-379.
- [89] Hasi W L J, Wang X Y, Cheng S X, et al. Research on the compression properties of FC-3283 and FC-770 for generating pulse of hundreds picoseconds[J]. *Laser and Particle Beams*, 2013, 31(2): 301-305.
- [90] Guo X Y, Hasi W L J, Zhong Z M, et al. Research on the SBS mediums used in high peak power laser system and their selection principle[J]. *Laser and Particle Beams*, 2012, 30(4): 525-530.
- [91] 仲召明. SBS百皮秒脉冲压缩介质研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 43-46. (Zhong Zhaoming. Research on the media for hundred picoseconds pulse compression by SBS[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 43-46)
- [92] Hasi Wuliji, Zhong Zhaoming, Qiao Zhi, et al. The effects of medium phonon lifetime on pulse compression ratio in the process of stimulated Brillouin scattering[J]. *Optics Communications*, 2012, 285(16): 3541-3544.

- [93] Hasi Wuliji, Zhao Hang, Lin Dianyang, et al. Characteristics of perfluorinated amine media for stimulated Brillouin scattering in hundreds of picoseconds pulse compression at 532 nm[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13: 061901.
- [94] Yuan H, Lu Z W, Wang Y L, et al. Hundred picoseconds laser pulse amplification based on scalable two-cells Brillouin amplifier[J]. *Laser and Particle Beams*, 2014, 32(3): 369-374.
- [95] Yuan Hang, Wang Yulei, Zhu Chengyu, et al. Investigation of sub-phonon lifetime pulse amplification in active frequency matching stimulated Brillouin scattering[J]. *Optics Express*, 2019, 27(12): 16661-16670.
- [96] Chalus O, Diels J C. Lifetime of fluorocarbon for high-energy stimulated Brillouin scattering[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(3): 606-608.
- [97] Wang Hongli, Cha S, Kong Hongjin, et al. Sub-nanosecond stimulated Brillouin scattering pulse compression using HT270 for kHz repetition rate operation[J]. *Optics Express*, 2019, 27(21): 29789-29802.
- [98] Tomov I V, Fedosejevs R, McKen D C D. Stimulated Brillouin scattering of KrF laser radiation in dichlorodifluoromethane[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1985, 21(1): 9-11.
- [99] 王超, 吕志伟, 林殿阳, 等. 介质参数对受激布里渊散射脉宽压缩的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2002, 14(5): 713-716. (Wang Chao, Lü Zhiwei, Lin Dianyang, et al. Dependence of pulse duration on parameters of medium in stimulated Brillouin scattering[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(5): 713-716)
- [100] 哈斯乌力吉, 吕志伟, 何伟明, 等. 介质参数对受激布里渊散射特性的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(1): 51-54. (Hasi Wuliji, Lü Zhiwei, He Weiming, et al. Influence of medium parameters on the characteristics of stimulated Brillouin scattering[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(1): 51-54)
- [101] 林殿阳, 蒋萧村, 王淑杰, 等. 宽带KrF激光抽运SF₆受激布里渊散射的脉宽稳定性[J]. *中国激光*, 2008, 35(2): 163-167. (Lin Dianyang, Jiang Xiaocun, Wang Shujie, et al. Pulse duration stability of stimulated Brillouin scattering in SF₆ pumped by a broadband KrF laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(2): 163-167)
- [102] 远航. 基于主动频率匹配SBS的百皮秒激光脉冲放大技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 43-44. (Yuan Hang. Investigation on amplification of hundred picoseconds laser pulses via active frequency matching stimulated Brillouin scattering[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 43-44)
- [103] 王雪阳. SBS百皮秒脉冲压缩特性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 27-28. (Wang Xueyang. Research on the compression properties for generating SBS pulse of hundreds picosecond[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 27-28)
- [104] Kong Hongjin, Beak D H. Prepulse technique for preserving the pulse shape of the stimulated Brillouin scattering[C]//Proceedings of SPIE 6454, High Energy/Average Power Lasers and Intense Beam Applications. San Jose, California, United States: SPIE, 2007: 64540E.
- [105] 郭少锋, 陆启生, 程湘爱, 等. 光学透明材料中瞬态SBS过程的数值研究[J]. *物理学报*, 2004, 53(1): 99-104. (Guo Shaofeng, Lu Qisheng, Cheng Xiangai, et al. Numerical study for transient SBS process in transparent optical materials[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(1): 99-104)
- [106] Liu Zhaohong, Wang Yulei, Wang Yirui, et al. Pulse-shape dependence of stimulated Brillouin scattering pulse compression to sub-phonon lifetime[J]. *Optics Express*, 2018, 26(5): 5701-5710.
- [107] 王超, 吕志伟, 林殿阳, 等. 利用受激布里渊散射压缩获得小于介质1/4超声振荡周期的激光脉冲[J]. *中国激光*, 2006, 33(s): 226-228. (Wang Chao, Lü Zhiwei, Lin Dianyang, et al. Laser pulse with duration shorter than 1/4 of hypersound oscillation period of medium achieved by stimulated Brillouin compressor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(s): 226-228)
- [108] 成思勋. 全氟胺系列介质的SBS百皮秒脉冲压缩特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学. 2014: 23-24. (Cheng Sixun. Research on the series media of perfluoroamine for hundred picoseconds pulse compression by SBS[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 23-24)
- [109] 李杏. 基于短寿命介质SBS短脉冲压缩的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 27-29. (Li Xing. Investigation on SBS short pulse compression based on medium with short phonon lifetime[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 27-29)
- [110] Brillouin L. Diffusion of light and X-rays by a homogeneous transparent body[J]. *Annales of Physique*, 1922, 9(17): 88-122.
- [111] Chiao R Y, Townes C H, Stoicheff B P. Stimulated Brillouin scattering and coherent generation of intense hypersonic waves[J]. *Physical Review Letters*, 1964, 12(21): 592-595.
- [112] Brewer R G, Rieckhoff K E. Stimulated Brillouin scattering in liquids[J]. *Physical Review Letters*, 1964, 13(11): 334-336.
- [113] Ippen E P, Stolen R H. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 21(11): 539-541.
- [114] Hon D T. Applications of wavefront reversal by stimulated Brillouin scattering[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21: 212252.
- [115] Kubeček V, Hamal K, Procházka I, et al. Compression of the Nd: YAP laser pulse by two-stage stimulated backward scattering[J]. *Optics Communications*, 1989, 73(3): 251-256.
- [116] Velchev I, Neshev D, Hogervorst W, et al. Pulse compression to the subphonon lifetime region by half-cycle gain in transient stimulated Brillouin scattering[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1999, 35(12): 1812-1816.
- [117] Kong Hongjin, 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.
- [118] 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.
- [119] 刘照虹, 李森森, 白振旭, 等. 受激布里渊散射Stokes脉冲展宽现象抑制研究[J]. *光电技术应用*, 2019, 34(2): 17-21. (Liu Zhaohong, Li Sensen, Bai

- Zhenxu, et al. Stokes duration broadening suppressing in the process of stimulated Brillouin scattering compression[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2019, 34(2): 17-21
- [120] Wang Hongli, Cha S, Kong Hongjin, et al. Rotating off-centered lens in SBS phase conjugation mirror for high-repetition-rate operation[J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9895-9905.
- [121] Andreev N, Kulagin O P, Palashov O V, et al. SBS of repetitively pulsed radiation and possibility of increasing the pump average power[C]//Proceedings of SPIE 2633, Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion. Monterey, CA, United States: SPIE, 1995.
- [122] Buzyalis R R, Dementjev A S, Kosenko E K. Formation of subnanosecond pulses by stimulated Brillouin scattering of radiation from a pulse-periodic YAG: Nd laser[J]. *Soviet Journal of Quantum Electronics*, 1985, 15(10): 1335-1337.
- [123] Gowers C W, Brown B W, Fajemirokun H, et al. Recent developments in LIDAR Thomson scattering measurements on JET (invited)[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(1): 471-475.
- [124] Kim H J, Lee E G, Kim C Y. A high-multi target resolution focal plane array-based laser detection and ranging sensor[J]. *Sensors*, 2019, 19: 1210.
- [125] 向祥军, 李剑彬, 周丹丹, 等. 高峰值功率光纤脉冲激光系统[J]. *中国激光*, 2018, 45: 0601002. (Xiang Xiangjun, Li Jianbin, Zhou Dandan, et al. High-peak-power fiber pulse laser system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45: 0601002)
- [126] Yu Tianbiao, Bao Yiting. Research on manufacturing technology of thin-walled parts of Fe105 metal based on laser cladding[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1187: 032043.
- [127] Kang Zhijun, Fan Zhongwei, Huang Yutao, et al. High-repetition-rate, high-pulse-energy, and high-beam-quality laser system using an ultraclean closed-type SBS-PCM[J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 6560-6571.
- [128] Bourne O L, Alcock A J. Simplified technique for subnanosecond pulse generation and injection mode-locking of a XeCl laser[J]. *Applied Physics B*, 1985, 36(4): 181-185.
- [129] Zhang Fangpei, Lou Qihong, Dong Jingxing, et al. Generation of 1.5~12 ns width-tunable 532 nm pulses by adopting laser-induced plasma shutter technique[J]. *Optik*, 2009, 120(5): 237-241.
- [130] Hasi W L J, Lu Z W, Lu H H, et al. Investigation on pulse compression based on stimulated Brillouin scattering and optical breakdown[J]. *Applied Physics B*, 2010, 98(2/3): 397-400.
- [131] Long Xin, Zou Weiwen, Chen Jianping. All-optical pulse compression of broadband microwave signal based on stimulated Brillouin scattering[J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 5162-5171.
- [132] Long Xin, Zou Weiwen, Ji Yi, et al. Accurate measurement of time delay of broadband microwave signal via high-repetition-rate pulse train probing SBS based all-optical pulse compression[J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33330-33337.
- [133] Ji Yi, Zou Weiwen, Long Xin, et al. Signal-to-noise ratio enhancement of stimulated Brillouin scattering based pulse compression of an ultrabroad microwave signal by use of a dispersion compensation fiber[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(15): 2980-2983.
- [134] Chen Xudong, Chang Chengcheng, Pu Jixiong. Stimulated Brillouin scattering phase conjugation of light beams carrying orbit angular momentum[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15: 030006.
- [135] Gao Wei, Mu Chunyuan, Li Hongwei, et al. Parametric amplification of orbital angular momentum beams based on light-acoustic interaction[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107: 041119.
- [136] Zhu Zhihan, Gao Wei, Mu Chunyuan, et al. Reversible orbital angular momentum photon-phonon conversion[J]. *Optica*, 2016, 3(2): 212-217.