

文章编号: 0258-7025(2010)04-0901-11

光纤布里渊激光器和放大器的研究进展及其应用

詹黎 顾照昶 邢亮 钱楷 沈启舜 夏宇兴

(上海交通大学物理系区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

摘要 回顾了基于受激布里渊散射(SBS)的光纤激光器和放大器的研究进展及其应用。由于受激布里渊散射固有的独特性质,光纤布里渊激光器(FBL)和放大器(FBA)在许多领域中有着重要的应用。特别是它们在光信号慢光缓存、超窄线宽激光光源、多波长光纤激光器、光生微波信号的应用开拓近年来引起了广泛的关注,重点回顾了这些研究领域中的应用及研究的最新进展。由于光纤布里渊激光器和放大器具有一系列优异的特性,在全光通信、相干光通信及光纤传感等领域中具有日益广泛而重要的应用前景。

关键词 光纤光学;受激布里渊散射;光纤激光器;多波长激光器;慢光;光纤布里渊放大器;光生微波信号

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103704.0901

Advances of Fiber Brillouin Lasers and Amplifiers and Their Applications

Zhan Li Gu Zhaochang Xing Liang Qian Kai Shen Qishun Xia Yuxing

(State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Physics Department,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract Optical fiber lasers and amplifiers based on stimulated Brillouin scattering (SBS) in optical fibers and their applications are reviewed. Due to their intrinsically unique characteristics, fiber Brillouin amplifier (FBA) and Brillouin fiber laser (BFL) have important applications in many fields. In particular, researches on FBA-based optical slow light buffer, ultra-narrow line-width BFL, multi-wavelength BFL and optical generation of microwave signals based on BFL have been attracting much attention in recent years. Their latest advances are focused in this review. Because of its potential applications, SBS in optical fibers may play important roles in fields of future all-optical telecommunication systems, coherent optical transmission systems and optical fiber sensing.

Key words fiber optics; stimulated Brillouin scattering; fiber laser; multi-wavelength laser; slow light; fiber Brillouin amplifier; optical generation of microwave signals

1 引 言

自从 1972 年以来^[1],光纤中的受激布里渊散射(SBS)已被广泛研究。SBS 是光纤中效率最高的非线性现象,对于数十千米长光纤,连续激光抽运的 SBS 阈值仅为毫瓦量级,因此在光纤中十分容易观察到 SBS 现象。然而,SBS 也限制了光纤所能传输的光功率,特别是会对构造高功率窄线宽光纤激光器产生严重问题^[2,3]。为了避免不利于光纤传输的负面作用,也产生了许多抑制 SBS 的技术,例如,通过频率或相位调制来增加信号的频谱线宽^[4],使用

非均匀光纤^[5~7],利用光纤布拉格光栅^[8]等。此外,偏振复用技术也可以抑制 SBS。

相对于其负面作用,光纤 SBS 因其固有的低阈值功率^[9]、超窄线宽增益、极高的转换效率,能够实现性能独特的光纤布里渊放大器(FBA)和布里渊激光器(BFL),这些技术能够应用于慢光缓存、分布式光纤传感^[10]、光滤波器^[11]、相干光通信^[12]和精密频率激光技术等领域。由于其独特而优越的性能,光纤布里渊放大器及激光器的应用日益广泛。本文总结了关于近年来光纤 SBS 的研究进展,系统总结了

收稿日期:2009-05-14;收到修改稿日期:2009-07-16

基金项目:国家自然科学基金(10874118/60577048)、教育部科学技术研究重点项目(109061)和教育部新世纪优秀人才支持计划资助课题。

作者简介:詹黎(1969—),男,博士,教授,主要从事光纤光学与光纤激光器方面的研究。E-mail:lizhan@sjtu.edu.cn

FBA 和 BFL 的最新研究进展,并分析其重要应用。

2 光纤中的受激布里渊散射

光纤中的 SBS 过程可以看作在产生芯层中的三波相互作用^[13]。由于电致伸缩效应,作为抽运的入射光在光纤中激发出声波,然后被声波散射产生频率下移的斯托克斯(Stokes)光。相互作用的过程中,能量和动量守恒

$$\omega_A = \omega_p - \omega_s, \quad \mathbf{K}_A = \mathbf{K}_p - \mathbf{K}_s, \quad (1)$$

式中下标 A 表示声波,P 表示抽运光,S 表示 Stokes 光。由于光纤的波导结构,光只能在两个方向上传输,当抽运光和 Stokes 光传输方向反向时,增益达到最大,Stokes 光频率下移为

$$\nu_B = 2nv_A/\lambda_p, \quad (2)$$

式中 n 为光纤折射率, ν_A 为光纤中的声速, λ_p 为抽运波长。

因为声波是指指数衰减的,稳态条件下的连续或准连续光抽运的布里渊增益为洛仑兹线型^[13]

$$g(\omega) = g_p \frac{(\Gamma_B/2)^2}{(\omega - \omega_0)^2 + (\Gamma_B/2)^2}, \quad (3)$$

式中 g_p 为布里渊增益系数的峰值, $\Gamma_B/2\pi$ 为布里渊线宽, ω_0 为中心频率。

对于连续或者长脉冲($>1 \mu\text{s}$)抽运,只需几个毫瓦就能获得大增益^[14]。然而,对于抽运光线宽较宽或脉冲抽运的情况,布里渊增益大为降低。当洛仑兹型抽运带宽为 $\Delta\nu_p$,而 SBS 增益线宽为 $\Delta\nu_B$ 时,增益谱仍可用(3)式来表示,但增益系数峰值 g'_p 降为

$$g'_p = \Delta\nu_B g_p / (\Delta\nu_B + \Delta\nu_p). \quad (4)$$

因此,如果抽运脉冲宽度远小于声子寿命($<1 \text{ ns}$),布里渊增益可能降低到比拉曼增益还要低。

由于材料组分不同,不同光纤的布里渊频移、线宽和增益系数有较大差异。例如,在单模亚硫酸盐光纤中 SBS 的 Stokes 频移为 7.882 GHz,增益线宽为 23.6 MHz^[15],而在标准的单模光纤(SMF)中分别约为 11 GHz 和 30 MHz。Stokes 频移受光纤芯层中 GeO_2 浓度、温度和应力等因素影响^[16,17],因此利用 Stokes 频移随温度和应力变化的特性,SBS 可以用来实现光学传感。特别与光时域反射技术相结合,可以发展成基于 SBS 的远程分布式光纤传感^[10]。

高非线性光纤,如硫族化合物光纤^[18]和亚硫酸盐玻璃光纤^[15]的 SBS 增益因子还可以增强超过 2 个数量级。同时研究也表明,布里渊阈值受到光纤材料、长度和数值孔径还有抽运波长的影响^[19]。一

般来说,SBS 阈值随增益因子的下降而增加^[20]。

在 SBS 过程中,当满足相位匹配条件时,Stokes 光的光强呈指数增长。图 1(a)为 SBS 的放大示意图,(b)为石英光纤中不同信号强度 $I_s(L)/I_p(0)$ 下的 $I_p(0)/I_s(0)$ 曲线图(Stokes 光从 $z = L$ 处入射,沿 $-z$ 方向传播。 I_s, I_p 分别为信号和抽运光光强)。在不考虑抽运消耗的条件下,放大的 Stokes 光随指数增长。SBS 放大具有极大转换效率,转换效率可以达到 80% 以上。因此在详细的理论分析中,一般要考虑抽运消耗带来增益饱和和效应^[13]。

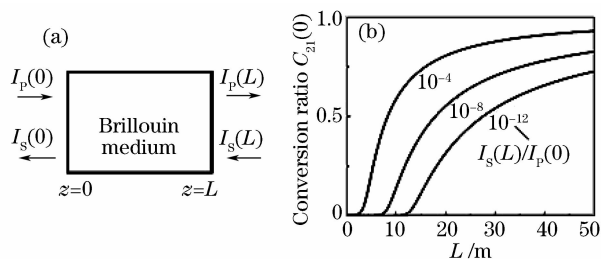


图 1 SBS 放大。(a) 示意图;(b) 能量转换率和光纤长度的关系

Fig. 1 SBS amplification. (a) general scheme; (b) energy conversion ratio versus the fiber length

3 光纤布里渊放大器

光纤 SBS 放大具有极高的转换效率,自然首先被想到应用于光放大领域。FBA 最早是在 1986 年由 N. A. Olsson 等报道的^[14]。他们通过利用光纤中的 SBS 消除信号光的传输损耗甚至产生增益。其后有关 FBA 的研究主要是在 20 世纪最后 20 年里报道的^[14,21~25]。然而,相对于光纤拉曼放大器和掺铒光纤放大器(EDFA)的宽带增益,FBA 带宽只有几十兆赫兹,严重限制了其可适用的通信速度。因此作为光放大器的一员,FBA 在很长时间里被忽视。最近几年,由于其独特的窄带增益和高转换效率,FBA 在放大器以外的许多领域中得到了新的应用。例如,作为超窄线宽主动滤波器的选择性放大^[12],在大容量波长复用系统中实现信道选择^[26]。在文献^[27]中可以了解到详细的讨论。

首先是对 FBA 基础特性做了深入的研究。M. F. Ferreira 等^[25]研究了信号频率偏离 SBS 线型中心的情况下的增益和噪声特性及其非线性相移。他们发现,频率偏离会降低线性区增益,增强饱和区自发噪声。C. N. Pannell 等^[24]研究了分布增益下的 SBS(在轻掺杂稀土离子的光纤中实现),可以在和光纤温度噪声相比拟的条件下产生多级 Stokes 光。

这种现象与光纤环中光放大导致的 SBS 类似^[28]。在理论上, A. Kobyakov 等^[29]提出了抽运消耗情况下的 SBS 放大的解析解, 这对预测高增益 FBA 的性能具有指导意义。

为了提高 FBA 的输出功率, S. J. Strutz 等^[30,31]报道了一种利用 SBS 的窄带增益和 EDFA 的高输出功率相结合的混合放大器, 能实现高功率低噪声输出。在该放大器中, 相位调制的分布反馈 (DFB) 激光的一级边频作为信号光, 放大后的 DFB 激光作为布里渊抽运, 如图 2 所示^[30]。该方案中的调制频率与 Stokes 频移必须严格相等。然而, Stokes 频移会随环境温度变化, 而增益带宽仅为几十兆赫兹, 在实际应用时必须进行信号监测与温度控制。调制产生的闲置高频边带也会与有用信号一起输出。另外, 高速调制所需的微波 (RF) 信号源和

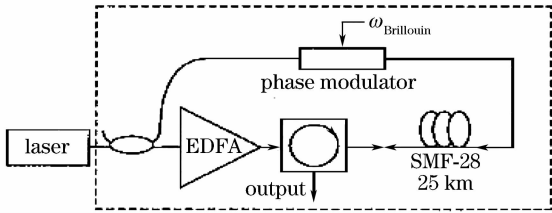


图 2 S. J. Strutz 等提出的混合布里渊掺铒放大器结构示意图

Fig. 2 Experimental scheme of hybrid Brillouin/erbium amplifier proposed by S. J. Strutz *et al.*

调制器的成本也较高。

为克服上述方案的不足, 提出了布里渊激光器产生种子光的布里渊-掺铒混合放大器^[32], 这一方案能够实现高稳定、低相对强度噪声 (RIN) 的激光放大输出, 如图 3 所示。布里渊激光器产生的种子光严格等于布里渊放大器的 Stokes 频移。由于 SBS 的窄带滤波特性, 这种放大光源的 RIN (RF 大于 200 MHz) 比基于 EDFA 的光源要低约 10 dB, 如图 4 所示, 并具有环境不敏感、高功率输出的优点。因为无需使用高频信号源, 成本也很低。这种高稳定的超窄线宽激光光源十分适用于模拟光通信系统、相干光通信及基于相干检测的光纤传感网中。

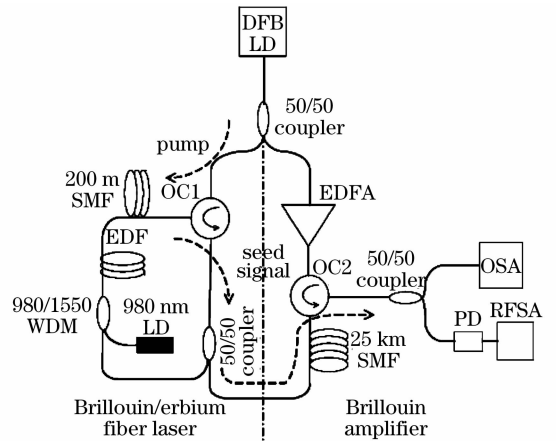


图 3 高稳定的混合布里渊掺铒放大器结构图

Fig. 3 Advanced scheme of hybrid Brillouin/erbium amplifier

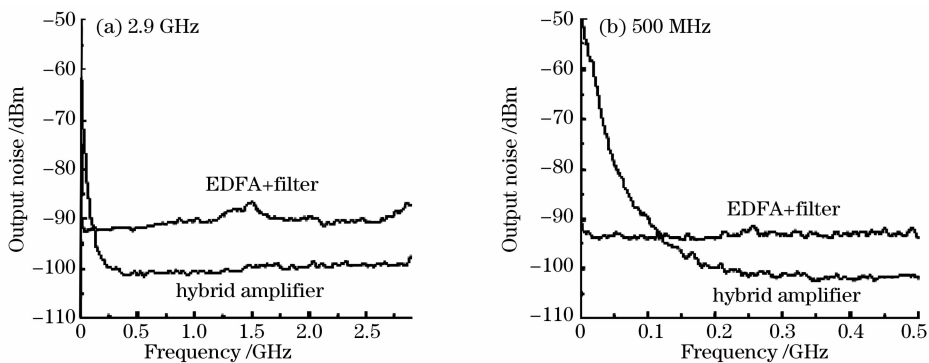


图 4 混合放大光源与 EDFA 放大光源的输出噪声功率谱 (100 kHz 分辨率)

Fig. 4 Output noise power spectra (at 100 kHz resolution bandwidth) of the hybrid amplified source and the EDFA amplified source with a filter

作为光放大器, 噪声特性是需要考虑的重要指数。一般来说, FBA 的噪声指数比理想放大器大 20 dB^[21,23], 这会限制 FBA 作为预放大器的应用。一般的 FBA 中作为 SBS 介质的光纤长度很长, 在 10 km 左右。长光纤虽然能降低阈值, 但也限制了 SBS 过程中适用的抽运光功率。当抽运功率超过阈

值时, 会产生自发布里渊放大 (SBA)。SBA 不仅消耗抽运功率继而引起信号光饱和, 而且还劣化 FBA 的噪声指数。实用光纤系统要求较高的信噪比 (SNR)。由于噪声、光纤损耗和接收器灵敏度等因素, 信号强度不能太低^[33]。但对于信号与抽运功率比 (SPR) 较高的 FBA, 容易产生增益饱和^[34]。为了

使较高功率信号保持同样的 SPR,就需要高抽运功率。然而,提高抽运功率可能超过造成 SBA 的布里渊阈值,会劣化噪声指数。为了解决这个问题,我们提出了使用较短光纤的低噪声高功率 FBA^[34],因为短光纤允许高抽运功率。这种 FBA 能实现无饱和增益放大,并且其噪声指数只有 4 dB,这说明合理优化抽运功率和 SBS 阈值的关系,FBA 同样可以实现低噪声、大功率输出。

作为 FBA 重要的应用开拓,当前 SBS 慢光缓存器引起了广泛的兴趣。在未来全光路由器中,控制光传输的群速度对于光缓存器和全光信号处理十分关键^[35]。光纤 SBS 慢光同样是利用 FBA 的高增益窄带放大特性。与其他慢光方法相比,基于 FBA 的慢光方案^[36,37]具有很多优点,例如,室温运行,阈值功率低,可以工作于任何波长,相对延迟时间大,和现有光通信系统互相兼容,是当前最有可能成为适用于光通信信号实用化缓存的慢光方案。

在早期 SBS 慢光实验中,延迟时间相对较小,可适用带宽也限于几十兆赫兹。SBS 慢光的延迟时间与增益(分贝数)成正比,要得到大的延迟量,必须提高增益。单级放大器增益会有上限,需要通过级联^[38]来实现较大的延迟时间,但自发布里渊噪声积累会阻碍更多级级联的可能。因此重点还是要通过实现低噪声高增益的单级 SBS 放大来增加延迟量^[34]。光纤 SBS 固有增益带宽很小,要应用于高速通信系统必须增大 FBA 的带宽。研究表明,宽带 SBS 增益谱可以表示为抽运光频谱与 SBS 固有带宽的卷积^[39]。实现宽带增益的典型方法是 M. G. Herraez 等^[39]在 2006 年报道的。通过一个 38 Mbit/s 的信号调制抽运激光器的电流,把增益带宽扩大到了 325 MHz,相对时间延迟约为 1.1。后来,他们又用双抽运实现了 25 GHz 带宽的 SBS 慢光^[40]。当其中一个抽运光所产生的损耗被另一个抽运的增益谱所补偿时,就可以得到宽带增益。我们提出了通过相位调制抽运光来优化 SBS 增益带宽以适用于高速信号缓存^[41]。相位调制抽运不仅能有效提高布里渊增益带宽,同时抽运为恒包络,具有良好的信号传输稳定性。相位调制抽运方法可以保证 SBS 慢光延迟宽带信号的可靠性,并可以使载波频率偏离 SBS 增益峰来抑制波形失真。

FBA 慢光的存储能力受到增益饱和的限制,而且还与脉冲展宽有关^[42]。SBS 慢光研究的重点在于增加延迟时间,降低噪声,减少脉冲变形。尽管其缓存时间还较短,但是这类缓存器可以在数据同步、

数据比特均衡和全光路由器起到重要作用。

4 布里渊光纤激光器

作为布里渊放大器的自然拓展,基于 SBS 效应的光纤激光器同样引起广泛兴趣。BFL 首先是 K. O. Hill 等^[43]在 1976 年报道的。文献^[44]还报道了频谱宽度为 2 kHz,固有线宽小于 30 Hz 的 BFL。如图 5 所示,抽运光(由箭头 P 表示)被逆时针方向耦合进一个 SMF 环腔,探测设备(DET)监测抽运光,在顺时针方向能观察到 SBS 激光(由箭头 B 表示)产生,转换效率为 25%。此结构也能构建共腔 SBS 激光器^[44]。极高相干性、极窄线宽和高稳定性是 BFL 的关键特性,这些特性使 BFL 在许多领域内展示出了应用潜力,特别是在激光线宽窄化^[45]、微波信号产生^[46]和光学转动传感^[44]等领域。BFL 一般采用高精细度的全光纤无源环形谐振腔^[44]来实现低阈值和高转换效率。如果抽运光频率和某个腔模共振,其起振阈值仅为毫瓦量级^[47]。只有少数实验采用无源线形腔结构^[15,48~50],这主要是因为线形腔 BFL 中容易产生高阶 Stokes 和反 Stokes 光信号,而且抽运光会与布里渊激光信号一起输出。

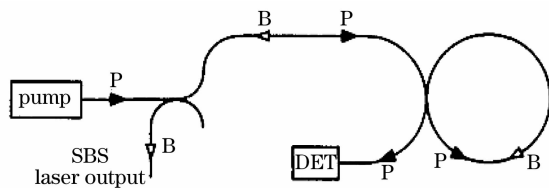


图 5 SBS 光纤环形激光器结构图

Fig. 5 Simplified schematic of SBS fiber ring laser

BFL 输出线宽极窄,而且频率稳定性也极好^[51]。其频率稳定性主要由三大因素决定:温度、非线性 Kerr 效应和频率牵引效应^[52]。BFL 振荡频率由布里渊增益峰附近的腔模决定,但增益峰和腔模都受到温度的影响^[53]。另外,Kerr 效应,SBS 的非线性相移^[54]和模式牵引效应^[55]也会使振荡频率有所飘移。为了稳定 Stokes 振荡,文献^[56]使用主动频率锁定方法,采用温度控制的全保偏光纤环结构,并通过反馈信号调节抽运光频率使其和腔模达到共振,实现了 Stokes 输出信号的 RIN 和频率噪声相对于布里渊抽运光信号降低了 20 dB。

如果在 BFL 谐振腔中所产生的第一阶 Stokes 信号功率足够高,还可能作为下一阶的布里渊抽运,继续产生第二阶的 Stokes 信号^[52]。只要布里渊抽运功率足够高,这一过程可以级联下去,产生更高阶 Stokes 信号,从而形成多波长 BFL。这种现象首先

由 K. O. Hill 等^[48]在线形腔 BFL 中观察到,之后 J. Botineau 等^[57]指出了在环形腔 BFL 中也有这种现象,S. Randoux 等^[58]从理论和实验上研究了这种高阶 Stokes 信号产生的瞬态和稳态过程。

除无源谐振腔 BFL 以外,利用有源腔构建 BFL 的研究更为丰富。布里渊掺铒混合光纤激光器 (BEFL) 最先是在 1996 年由 G. J. Cowle 等报道的^[59]。BEFL 是利用 EDFA 的线性增益和 SBS 的非线性增益叠加产生激光,输出波长由布里渊抽运的 Stokes 频移决定,因 EDFA 的高增益特性能够实现高功率输出。通过内接光纤级联,这种激光器可以产生约 10 GHz 频率间隔的多波长光梳^[60]。典型的多波长 BEFL 结构如图 6 所示,布里渊抽运光沿着逆时针方向注入环形腔,对腔内顺时针传输的光进

行放大。部分信号光再通过反 S 形腔结构作为下一级的抽运光,如此循环。在 BEFL 中 SBS 增益必须抑制 EDF 自由振荡模式所产生的均匀加宽机制,这就要求布里渊抽运波长应接近 EDF 自由振荡波长。由于 SBS 是一种阈值效应,一旦信号功率达到 SBS 的阈值后,再改变 980 nm 抽运光的功率,BEFL 输出功率的变化就很小^[28]。

由于 BEFL 结合了 EDF 的高增益和 SBS 的窄带增益特性,总的混合增益表现为非均匀展宽的特性,适合产生多阶 Stokes 振荡。BEFL 具有频率间隔固定和线宽极窄的特性。通过注入高功率布里渊抽运使腔内 EDF 增益饱和,可以实现可调谐的 BEFL。由于结构简单、抽运功率低,并且可以自动形成相对于布里渊抽运波长的信道分布,BEFL 是适用于超密集波分复用系统的极具竞争力的光源之一^[61]。另外,BEFL 也可以应用于精细光谱、光学传感和光子器件检测等领域。

首台多波长 BEFL 只能输出 5 个波长^[60]。通过内接一条 Stokes 光的反馈光路,可以改进 BEFL 的性能^[62],得到多达 30 个波长。另外,通过腔内置一个分布反馈激光器能够实现双向输出布里渊光梳^[63]。之后,M. K. Abd-Rahman 等^[64]报道了一个双向双腔 BEFL,如图 7 所示。该 BEFL 能够产生 24 个波长,采用两个具有相同结构的光纤环,并共用同一段 SMF。在一个环形腔中产生的 Stokes 信号成为另一个腔中的布里渊抽运,这样产生了下一级的 Stokes 光,此过程反复进行,就在 EDF 的增益带宽内形成了多级 Stokes 光双向输出。

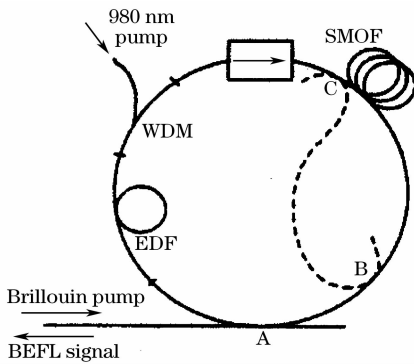


图 6 BEFL 结构图。反“S”形部分用来进行内部级联过程,实现多波长产生

Fig. 6 Schematic of the BEFL. The reverse-S-shaped section is used for internally-cascaded multiwavelength operation

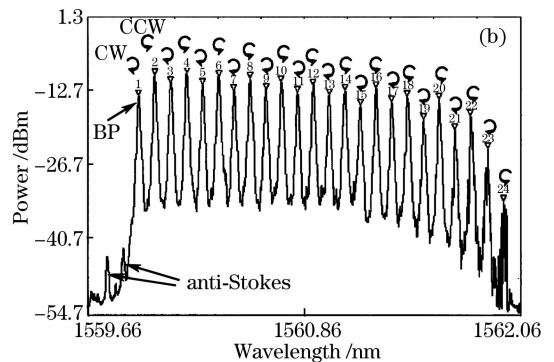
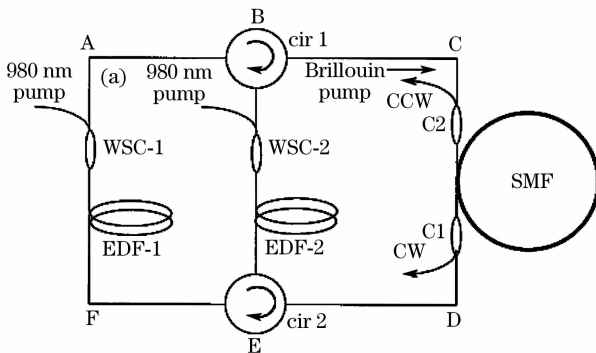


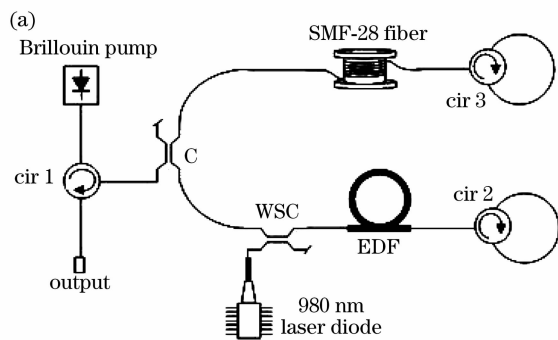
图 7 (a) 双腔 BEFL 结构图;(b) 双向双腔 BEFL 的输出频谱(两个输出口叠加)

Fig. 7 (a) Schematic of dual-cavity BEFL; (b) combined output spectrum of dual-cavity BEFL from the two output ports

线形腔 BEFL 也有报道^[65,66]。这种结构阈值低,容易产生空间烧孔(SHB)效应^[67]。空间烧孔效应能够抑制模式竞争并稳定多波长产生。线形腔被

认为更适合实现多波长光纤激光器的结构。另外,工作在 S 波段^[68]和 L 波段^[69~71]的 BEFL 也已有报道。布里渊激光输出一般是遏制自由振荡模式而受

激产生,因此 BEFL 的工作波长一般接近于 EDFL 的自由振荡波长。这样也导致了 BEFL 的调谐范围限于一小范围。文献[60]中,观察到在仅有一个 Stokes 信号的情况下,调谐范围也仅有 2 nm。在文献[72]中,预放大后的布里渊抽运会产生高强度 Stokes 信号从而导致均匀增益饱和,产生了 9 nm 的调谐范围。利用双谐振腔结构,调谐范围可以增大到 10 nm^[73]。文献[74]提出在环形腔中加入 Sagnac 滤波器调控自由振荡模的产生区域,使得可调谐范围增大到 14.5 nm,而且波长数维持在 12 个以上^[13]。至今,最大的调谐范围是 60 nm,是在线形腔系统中实现的^[75],如图 8 所示。该 BEFL 的宽调谐范围是通过注入高功率布里渊抽运使腔内 EDF 增



益饱和来实现的,其缺陷在于随着布里渊抽运功率的提高,虽然增大了可调范围,但是产生的波长数会减少。2009 年, M. Ajiya 等^[76]报道了一个结构简单的可调谐范围能够覆盖整个 C 波段的四波长 BEFL。该激光器使用色散补偿光纤 (DCF) 作为 SBS 介质和腔镜,只有在 DCF 中产生的 Stokes 信号才能反射回环形腔进行振荡,从根本上抑制了 EDF 自由振荡模的产生,消除了之前 BEFL 中限制可调谐范围的因素。理论上,这种 BEFL 的可调谐范围仅被 EDF 的增益谱范围所限制。这种方案不需要大功率布里渊抽运,结构十分简单,但是在 SBS 产生上仅采用原始的抽运光入射 DCF 产生的 Stokes 信号反射,因此在多波长的产生上效率较低。

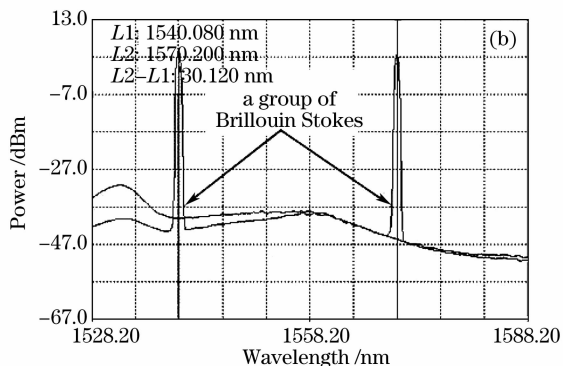


图 8 (a) 线形腔 BEFL 的实验装置图;(b) 布里渊抽运固定在 13 dBm, 980 nm 抽运为 50 mW 时的线形腔 BEFL 输出频谱的调谐范围

Fig. 8 (a) Experimental setup of a linear cavity BEFL; (b) tuning range of the output spectra of the linear cavity BEFL for Brillouin pump power fixed to 13 dBm and the 980 nm pump laser was 50 mW

上述所有实现 BEFL 的方法中,无论是从腔外注入还是在腔里内置产生,都必须用到布里渊抽运。采用这类布里渊抽运方法实现的光梳的最大波长数为 53^[77],而且因为大部分能量都集中在少数几个低阶 Stokes 频率上,各波长强度不均匀。2005 年,我们提出了一种自激发的多波长 BEFL^[28,78],如图 9 (a)所示。这种腔结构是不需要布里渊抽运的^[28]。由于 Sagnac 环境的反射,布里渊信号在腔内传输一周时两次通过 SMF。在振荡模起振后,SMF 中动态分布反馈的 Rayleigh 散射使得振荡模窄化^[79],最终满足产生 SBS 的条件。通过环形腔内级联过程,SBS 引起了雪崩过程,激发多波长光梳。每个 Stokes 信号在腔内传输一周的过程中得到 EDF 和 SMF 中 SBS 的增益。由于 SBS 增益的窄带特性,总增益谱形似梳状,如图 9(b)所示,产生了非均匀展宽机制。由于没有外加的布里渊抽运,Stokes 光的产生范围和波长数都大大增加。在图 9(c)中,观

察到了超过 120 个波长。并且光梳的强度均匀性得到了提高,在 3 dB 带宽中包含了 71 个布里渊波长。此外,利用 Sagnac 环的透射特性构造的自激发 BEFL 也有报道^[80]。

线形腔被认为更适合实现多波长光纤激光器的结构,如图 10(a)所示的线形腔自激发 BEFL^[81]能产生 160 个 Stokes 波长输出。光纤激光器因为腔很长,一般是多纵模激光输出。然而 SBS 窄带增益能抑制 EDF 的自由振荡过程,能使 BEFL 工作在单纵模状态^[81]。图 10(b)所示没有纵模拍频,表明该 BEFL 处于单纵模工作状态。

通常 BEFL 的可调谐是以牺牲 Stokes 波长数来实现的。而利用自激发结构,可以得到更大的调谐范围和更多的输出波长。最近,我们报道了具有约 200 波长输出,调谐波长可达到约 45 nm 的 BEFL^[82]。利用 Sagnac 环的直接透射输出还能提高 BEFL 的转换效率和输出功率^[83]。文献[84]还

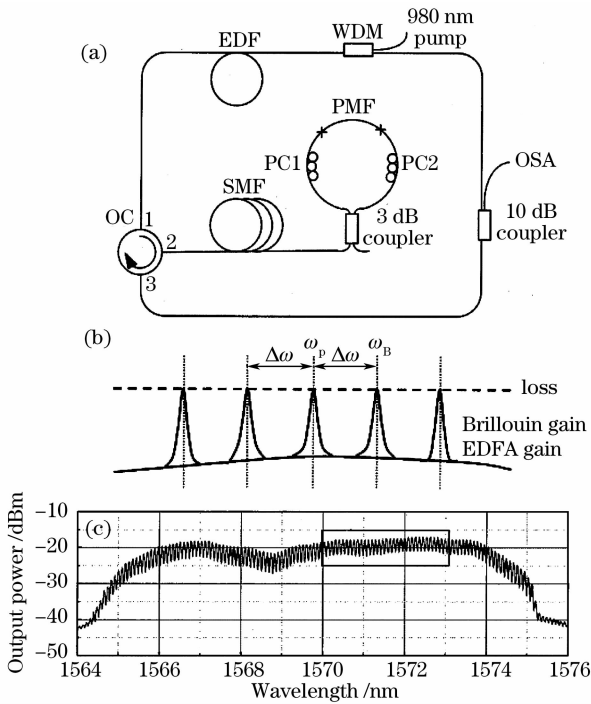


图 9 (a) 自激发多波长 BEFL 结构图; (b) 自激发 BEFL 的增益谱示意图; (c) 输出的布里渊频梳

Fig. 9 (a) Schematic of the self-seeded multiwavelength BEFL; (b) gain profile of each roundtrip for self-seeded BEFL; (c) spectra of the generated Brillouin combs

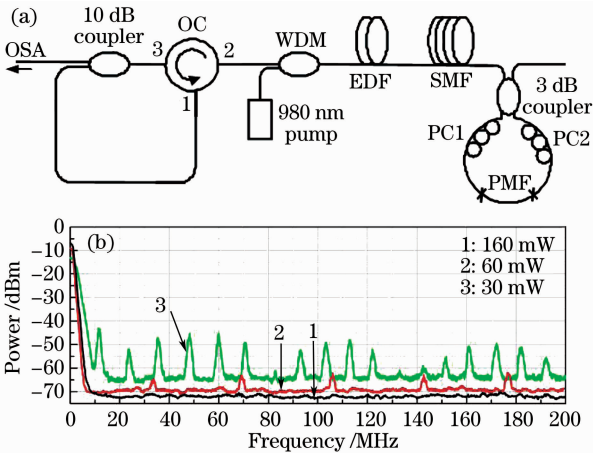


图 10 (a) 自激发线性腔 BEFL; (b) 频谱仪测得的相对强度噪声

Fig. 10 (a) Schematic of the self-seeded linear cavity BEFL; (b) measurement of the relative intensity noise by RF analyzer

报道了间隔可调的多波长激光器, 波长间隔从 0.08~1.20 nm 可调。由于 Stokes 频移与 GeO₂ 浓度、温度等因素有关, 如果优化光纤种类或温度, 波长间隔可以调整为波分复用(WDM)系统的国际电信联盟 (ITU-T) 标准。

近年来, 由于制备技术的发展, 产生了各种不同材料的单模光纤 (SMF), 其中硫族化合物光纤^[18]、亚硝酸盐玻璃光纤^[15] 和铋光纤^[85] 由于具有非常高的非线性系数, 可以大幅降低 SBS 阈值, 从而大幅度缩短 BFL 的光纤长度。K. S. Abedin^[86] 首先在实验中观测到了单模 As₂Se₃ 硫族化合物光纤中的 SBS 效应, 并且测得 Stokes 频移为 7.95 GHz, 布里渊增益系数 $g_B = 6.08 \times 10^{-9}$ m/W, 为标准 SMF 的 134 倍。2006 年, 他利用长度仅为 4.9 m 的单模 As₂Se₃ 光纤构造了单程 FBA 和 BFL^[87]。此 FBA 在布里渊抽运功率为 68 mW 时, 增益达 42 dB; BFL 的一阶 Stokes 阈值为 35 mW, 斜率效率为 38%。后又在 2 m 长的掺铈单模亚硝酸盐光纤中观测到了 SBS^[15], 测得 $g_B = (1.47 \sim 2.16) \times 10^{-10}$ m/W。G. Qin 等^[88] 用 200 m 非掺杂的单模 TBZN 亚硝酸盐光纤构造了环形腔 BFL 和 BEFL。BFL 阈值为 10 mW, 斜率效率为 38.2%, 而 BEFL 能产生可调谐多阶 Stokes 光。2009 年, S. W. Harun 等^[89] 用 2.15 m 长的单模掺铈铋光纤构建了结构紧凑的可调谐环形腔 BEFL。掺铈铋光纤同时作为掺铈光纤放大和受激布里渊放大介质, 提供线性和非线性增益, 大大缩短了腔长。由同种单模掺铈铋光纤构造的多波长 BEFL 也有报道^[90]。以上光纤所具有的高效率, 具有巨大的应用潜力。但是这些光纤具有较大的折射率 (>2.0), 菲涅耳反射系数较大 (约为 20%), 导致强烈的端面反射。因此需要特殊技术将它们与普通光纤对接^[15], 操作难度较大。

另外, 使用光子晶体光纤作为 SBS 介质来构造 BEFL 的方案^[91]、以掺铋双包层光纤同时提供线性增益与 SBS 非线性增益的多波长的方案^[92] 也有报道。2006 年, P. Dainese 等^[93] 研究了微结构光子晶体光纤中的 SBS, 他们发现由于特殊的光纤结构和应力, 这种光纤可以产生多种声波模式, 导致同时产生具有不同 Stokes 频移的多种模式 SBS 信号。这些光纤的特殊性质, 不仅拓展了 SBS 的频率产生范围, 还能探索出一系列的特殊应用。

5 应 用

光纤中的 SBS 还可以广泛应用于激光技术领域, 例如光纤相位共轭镜^[94]、光束合并^[95]、调 Q 激光器^[96] 和激光脉冲限幅^[97] 等。拉锥光纤 SBS 相位共轭器有高反射率、高灵敏度的优点, 可以用于高

功率激光系统中的脉冲压缩^[94]。利用基于多模光纤中 SBS 的技术实现激光光束合并^[95],可以产生优质的类高斯光束,并不受抽运光形状的影响。合并之后的相干度高达 67%,转换效率为 83%。另外, A. A. Fotiadi 等^[96]提出了光纤环中的反向 SBS 能够产生被动调 Q 光纤激光器,并提出了自洽模型解释了这一机制,实验也验证了这一模型的正确性。

另外,基于光纤 SBS 的放大器和激光器还被广泛应用于其他领域,例如光纤陀螺^[98]、分布光纤传感^[10]、在相干光传输中光电相位锁定^[12]等。A. Loayssa 等^[99]开发了一种基于 BEFL 的结构来实现光学载波抑制技术,这一技术能够实现 55 dB 载波衰减,而且能够精确控制载波振幅,并对传输特征或调制方式透明。D. L. Butler 等^[100]把 FBA 用作有源滤波器实现了 5 Gbit/s 归零码数据的光时钟恢复。这种结构不需要预知时钟频率信息,适用于高比特率系统。但信号的信噪比恶化会影响光时钟的提取^[101]。X. S. Yao^[102]利用光纤 SBS 实现了高稳定低噪声的可调谐微波信号产生。他们利用 SBS 放大的 Stokes 光与另一波长光的拍频信号实现光电振荡,使光信号转化为微波信号。这种方案不需要高成本的电学放大器,同时也消除了由电路系统产生的相位噪声;同时 SBS 的固有窄带滤波特性代替了体积笨重的电滤波器,进一步强化了可集成性。J. Geng 等^[103]利用两个窄线宽单频光纤激光器作为布里渊抽运输入到同一个无源环形腔中,产生的两个 Stokes 信号拍频产生微波信号,频率从 MHz 到 100 GHz 阶跃可调。这种结构无需频率锁定就能降低相位噪声、窄化线宽,输出信号具有很高的频率稳定性。

为了进一步开拓 BFL 的应用领域,进一步提高布里渊激光器的输出功率将是下一步研究的重点,也是当前要解决的重点问题。这不仅涉及到布里渊激光器和放大器的设计,也涉及到新结构光纤及光纤材料的研究。

6 结 论

尽管 SBS 会限制光纤的传输功率和激光器的输出功率,但因其是光纤中非常有效的非线性效应,具有十分重要的应用。利用光纤 SBS 的独特特性实现的 FBA 和 BFL 具有很多优点,在近年来,利用 FBA 或 BFL 实现光信号慢光缓存、超窄线宽高稳定的激光光源、多波长光纤激光器、光生微波信号等方面的研究引起了广泛关注,并取得了重大的进展。

因为基于 SBS 的光纤激光器和光纤放大器具有某些独特而优异的性能,将在许多领域中能够发挥日益广泛而重要的作用。

参 考 文 献

- 1 E. P. Ippen, R. H. Stolen. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, **21**(11):539~541
- 2 M. Auerbach, D. Wandt, C. Fallnich *et al.*. High-power tunable narrow line width ytterbium-doped double-clad fiber laser [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **195**(5-6):437~441
- 3 X. X. Yang, L. Zhan, Q. S. Shen *et al.*. High-power single-longitudinal-mode laser with a ring Fabry-Pérot resonator and a saturable absorber [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(11):879~881
- 4 E. Lichtman, A. A. Friesem, R. G. Waarts *et al.*. Stimulated Brillouin scattering excited by a modulated pump wave in single-mode fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(1):171~174
- 5 K. Shiraki, M. Ohashi, M. Tateda. Suppression of stimulated Brillouin scattering in a fibre by changing the core radius [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(8):668~669
- 6 N. Yoshizawa, T. Imai. Stimulated Brillouin scattering suppression by means of applying strain distribution to fiber with cabling [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(10):1518~1522
- 7 A. P. Liu. Suppressing stimulated Brillouin scattering in fiber amplifiers using nonuniform fiber and temperature gradient [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(3):977~984
- 8 H. Lee, G. P. Agrawal. Suppression of stimulated Brillouin scattering in optical fibers using fiber Bragg gratings [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(25):3467~3472
- 9 Shen Yichun, Song Muping, Zhang Xianmin *et al.*. Analysis and measurement of stimulated Brillouin scattering threshold in single mode fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):497~500
沈一春,宋牟平,章献民等. 单模光纤中受激布里渊散射阈值研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4):497~500
- 10 H. H. Kee, G. P. Lees, T. P. Newson. All-fiber system for simultaneous interrogation of distributed strain and temperature sensing by spontaneous Brillouin scattering [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(10):695~697
- 11 T. Tanemura, Y. Takushima, K. Kikuchi. Narrowband optical filter, with a variable transmission spectrum, using stimulated Brillouin scattering in optical fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(17):1552~1554
- 12 C. G. Atkins, D. Cotter, D. W. Smith *et al.*. Application of Brillouin amplification in coherent optical transmission [J]. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(10):556~558
- 13 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 4th ed.. Boston: Academic Press, 2007
- 14 N. A. Olsson, J. P. Van der Ziel. Cancellation of fiber loss by semiconductor laser pumped Brillouin amplification at 1.5 μm [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **48**(20):1329~1330
- 15 K. S. Abedin. Stimulated Brillouin scattering in single-mode tellurite glass fiber [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(24):11766~11772
- 16 M. Nikles, L. Thevenaz, P. A. Robert. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(10):1842~1851
- 17 Y. Q. Li, F. C. Zhang, T. Yoshino. Wide-range temperature dependence of Brillouin shift in a dispersion-shifted fiber and its annealing effect [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(7):

- 1663~1667
- 18 C. Florea, M. Bashkansky, Z. Dutton *et al.*. Stimulated Brillouin scattering in single-mode As_2S_3 and As_2Se_3 chalcogenide fibers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(25):12063~12070
- 19 V. I. Kovalev, R. G. Harrison. Threshold for stimulated Brillouin scattering in optical fiber [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(26):17625~17630
- 20 E. Lichtman, A. A. Friesem, R. G. Waarts *et al.*. Stimulated Brillouin scattering excited by two pump waves in single mode fiber [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1987, **4**(9):1397~1403
- 21 N. A. Olsson, J. P. Van der Ziel. Characteristics of a semiconductor laser pumped Brillouin amplifier with electronically controlled bandwidth [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1987, **5**(1):147~153
- 22 P. Bayvel, I. P. Giles, P. M. Radmore. Transient and steady-state characteristics of a Brillouin amplifier based on an all-fibre single-mode ring resonator [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1989, **21**:S113~S128
- 23 E. W. Tkach, A. R. Chraplyvy. Fiber Brillouin amplifiers [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1989, **21**(1):S105~S112
- 24 C. N. Pannell, P. S. Russell, T. P. Newson. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers: the effects of optical amplification [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(4):684~690
- 25 M. F. Ferreira, J. F. Rocha, J. L. Pinto. Analysis of the gain and noise characteristics of fibre Brillouin amplifiers [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 1994, **26**(1):35~44
- 26 A. R. Chraplyvy, R. W. Tkach. Narrowband tunable optical filter for channel selection in densely packed WDM systems [J]. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(20):1084~1085
- 27 M. O. Van Deventer, A. J. Boot. Polarization properties of stimulated Brillouin scattering in single-mode fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(4):585~590
- 28 Y. J. Song, L. Zhan, J. H. Ji *et al.*. Self-seeded multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(5):486~488
- 29 A. Kobyakov, S. Darmanyan, M. Sauer *et al.*. High-gain Brillouin amplification: an analytical approach [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(13):1960~1962
- 30 S. J. Strutz, K. J. Williams. Low-noise hybrid erbium/Brillouin amplifier [J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**:1359~1360
- 31 S. J. Strutz, K. J. Williams, R. D. Esman. Polarization-maintaining hybrid erbium-Brillouin amplifier for high-power low-noise sources [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(9):936~938
- 32 L. L. Yi, L. Zhan, W. S. Hu *et al.*. A highly stable low-RIN hybrid Brillouin/erbium amplified laser source [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(9-12):1028~1030
- 33 P. C. Becker, N. A. Olsson, J. R. Simpson. Erbium-Doped Fiber Amplifiers - Fundamentals and Technology [M]. San Diego and London: Academic Press, 1999
- 34 L. Xing, L. Zhan, S. Y. Luo *et al.*. High-power low-noise fiber Brillouin amplifier for tunable slow-light delay buffer [J]. *IEEE J. Quantum. Electron.*, 2008, **44**(12):1133~1138
- 35 R. W. Boyd, D. J. Gauthier, A. L. Gaeta. Application of slow light in telecommunications [J]. *Opt. Photon. News*, 2006, **17**(4):18~23
- 36 K. Y. Song, M. G. Herraiez, L. Thevenaz. Observation of pulse delaying and advancement in optical fibers using stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(1):82~88
- 37 Y. Okawachi, M. S. Bigelow, J. E. Sharping *et al.*. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(15):153902
- 38 K. Y. Song, M. G. Herraiez, L. Thevenaz. Long optically controlled delays in optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(14):1782~1784
- 39 M. G. Herraiez, K. Y. Song, L. Thevenaz. Arbitrary-bandwidth Brillouin slow light in optical fibers [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(4):1395~1400
- 40 K. Y. Song, K. Hotate. 25 GHz bandwidth Brillouin slow light in optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(3):217~219
- 41 Lilin Yi, Li Zhan, Weisheng Hu *et al.*. Delay of broadband signals using slow light in stimulated Brillouin scattering with phase-modulated pump [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(5-8):619~621
- 42 L. Xing, L. Zhan, L. L. Yi *et al.*. Storage capacity of slow-light tunable optical buffers based on fiber Brillouin amplifiers for real signal bit streams [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(16):10189~10195
- 43 K. O. Hill, B. S. Kawasaki, D. C. Johnson. CW Brillouin laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1976, **28**(10):608~609
- 44 S. P. Smith, F. Zarinetchi, S. Ezekiel. Narrow-linewidth stimulated Brillouin fiber laser and applications [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(6):393~395
- 45 D. R. Ponikvar, S. Ezekiel. Stabilized single-frequency stimulated Brillouin fiber ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1981, **6**(8):398~400
- 46 K. Kalli, D. O. Culverhouse, D. A. Jackson. Fiber frequency shifter based on generation of stimulated Brillouin scattering in high finesse ring resonators [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(19):1538~1540
- 47 L. F. Stokes, M. Chodorow, H. J. Shaw. All-fiber stimulated Brillouin ring laser with submilliwatt pump threshold [J]. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(10):509~511
- 48 K. O. Hill, D. C. Johnson, B. S. Kawasaki. CW generation of multiple Stokes and anti-Stokes Brillouin-shifted frequencies [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1976, **29**(3):185~187
- 49 M. R. Shirazi, S. W. Harun, M. Biglary *et al.*. Effect of Brillouin pump linewidth on the performance of Brillouin fiber laser [J]. *ISAST Trans. Elec. Signal Proc.*, 2007, **1**:30
- 50 M. R. Shirazi, S. W. Harun, M. Biglary *et al.*. Linear cavity Brillouin fiber laser with improved characteristics [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(8):770~772
- 51 J. Boschung, L. Thévenaz, P. A. Robert. High-accuracy measurement of the linewidth of a Brillouin fiber ring laser [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(18):1488~1489
- 52 Pierre-Alain Nicati, K. Toyama, H. J. Shaw. Frequency stability of a Brillouin fiber ring laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7):1445~1451
- 53 P. Nicati, K. Toyama, S. Huang *et al.*. Temperature effects in a Brillouin fiber ring laser [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(24):2123~2125
- 54 S. Huang, L. Thévenaz, K. Toyama *et al.*. Optical Kerr effect in fiber-optic Brillouin ring laser gyroscopes [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(3):365~367
- 55 P. Nicati, K. Toyama, S. Huang *et al.*. Frequency pulling in a Brillouin fiber ring laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(7):801~803
- 56 J. Geng, S. Staines, Z. Wang *et al.*. Highly stable low-noise Brillouin fiber laser with ultranarrow spectral linewidth [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(17):1813~1815
- 57 J. Botineau, C. Leycuras, C. Montes *et al.*. Stabilization of a stimulated Brillouin fiber ring laser by strong pump modulation [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, **6**(3):300~312
- 58 S. Randoux, V. Lecoche, B. Ségard *et al.*. Dynamical behavior of a Brillouin fiber ring laser emitting two Stokes components [J]. *Phys. Rev. A*, 1995, **52**(3):2327~2334
- 59 G. J. Cowle, D. Y. Stepanov. Hybrid Brillouin/erbium fiber

- laser [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(16):1250~1252
- 60 G. J. Cowle, D. Y. Stepanov. Multiple wavelength generation with Brillouin/erbium fiber lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(11):1465~1467
- 61 Y. S. Hurh, G. S. Hwang, J. Y. Jeon *et al.*. 1-Tb/s (100×2.4 Gb/s) transmission of 12.5-GHz-spaced ultradense WDM channels over a standard single-mode fiber of 1200 km [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(3):696~698
- 62 D. Yu. Stepanov, G. J. Cowle. 30-channel 10-GHz laser comb from a multiline Brillouin erbium fiber laser [C]. *Conference on Lasers and Electro-Optics*, vol. 11 of OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, Washington, D. C., 1997), CTuG6
- 63 S. Yamashita, G. J. Cowle. Bidirectional 10-GHz optical comb generation with an intracavity fiber DFB pumped Brillouin/erbium fiber laser [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(6):796~798
- 64 M. K. Abd-Rahman, M. K. Abdullah, H. Ahmad. Multiwavelength bidirectional operation of twin-cavity Brillouin/erbium fiber laser [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **181**(1-3):135~139
- 65 M. H. Al-Mansoori, B. Bouzid, B. M. Ali *et al.*. Multi-wavelength Brillouin-erbium fibre laser in a linear cavity [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **242**(1-3):209~215
- 66 D. S. Lim, H. K. Lee, H. Kim *et al.*. Generation of multiorder Stokes and anti-Stokes lines in a Brillouin erbium fiber laser with a Sagnac loop mirror [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(21):1671~1673
- 67 G. P. Agrawal, M. Lax. Analytic evaluation of interference effects on laser output in a Fabry-Perot resonator [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1981, **71**(5):515~519
- 68 S. W. Harun, X. S. Cheng, N. K. Saat *et al.*. S-band Brillouin erbium fibre laser [J]. *Electron. Lett.*, 2005, **41**(4):174~176
- 69 M. A. Mahdi, M. H. Al-Mansoori, M. Premaratne. Enhancement of multiwavelength generation in the L-band by using a novel Brillouin-erbium fiber laser with a passive EDF booster section [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(18):11570~11575
- 70 M. H. Al-Mansoori, J. S. Iqbal, M. K. Abdullah *et al.*. Low threshold characteristics of an L-band Brillouin-erbium comb fiber laser in a linear cavity [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(11):2281~2284
- 71 M. H. Al-Mansoori, M. A. Mahdi, M. Premaratne. Novel multiwavelength L-band Brillouin erbium fiber laser utilizing double-pass Brillouin pump preamplified technique [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(2):415~421
- 72 M. H. Al-Mansoori, M. A. Mahdi. Tunable range enhancement of Brillouin-erbium fiber laser utilizing Brillouin pump pre-amplification technique [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(11):7649~7654
- 73 S. W. Harun, H. Ahmad. Multiwavelength laser comb in L-band region with dual-cavity Brillouin/erbium fiber laser [J]. *Jpn. J. Appl. Phys. A*, 2002, **41**(11):1234~1236
- 74 Y. J. Song, L. Zhan, S. Hu *et al.*. Tunable multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser with a polarization-maintaining fiber Sagnac loop filter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(9):2015~2017
- 75 M. H. Al-Mansoori, M. Kamil Abd-Rahman, F. R. Mahamd Adikan *et al.*. Widely tunable linear cavity multiwavelength Brillouin-erbium fiber lasers [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(9):3471~3476
- 76 M. Ajiya, M. A. Mahdi, M. H. Al-Mansoori *et al.*. Seamless tuning range based-on available gain bandwidth in multiwavelength Brillouin fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(8):5944~5952
- 77 D. D. Park, J. H. Park, N. K. Park *et al.*. 53-line multi-wavelength generation of Brillouin/erbium fiber laser with enhanced Stokes feedback coupling [C]. *OFC 2000*, **3**, Paper ThA4-3, 11~13
- 78 Zhan Li, Song Yuejiang, Xia Yuxing. 128 wavelength self-seeded Brillouin fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(12):21~22
詹黎,宋跃江,夏宇兴. 128 波长输出的自注入布里渊光纤激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(12):21~22
- 79 A. A. Fotiadi, R. V. Kiyani. Cooperative stimulated Brillouin and Rayleigh backscattering process in optical fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(23):1805~1807
- 80 Wang Pinghe, Liao Xian, Rao Yunjiang. A novel self-exciting Brillouin erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12):2200~2204
汪平河,廖弦,饶云江. 一种新型自激发布里渊掺铒光纤激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12):2200~2204
- 81 L. Zhan, J. H. Ji, J. Xia *et al.*. 160-line multiwavelength generation of linear-cavity self-seeded Brillouin-erbium fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(22):10233~10238
- 82 Y. Huang, L. Zhan, J. H. Ji *et al.*. Multiwavelength self-seeded Brillouin-erbium fiber laser with 45-nm tunable range [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(3):452~456
- 83 Z. X. Zhang, L. Zhan, Y. X. Xia. Tunable self-seeded multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser with enhanced power efficiency [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**:9731~9736
- 84 Mable P. Fok, Chester Shu. Spacing-adjustable multi-wavelength source from a stimulated Brillouin scattering assisted erbium-doped fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(7):2618~2624
- 85 N. Sugimoto, T. Nagashima, T. Hasegawa *et al.*. Bismuth-based optical fiber with nonlinear coefficient of 1360 W⁻¹ km⁻¹ [C]. *Opti. Fiber Commun. Conf. (OFC)*, 2004, **2**:3
- 86 K. S. Abedin. Observation of strong stimulated Brillouin scattering in single-mode As₂Se₃ chalcogenide fiber [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(25):10266~10271
- 87 K. S. Abedin. Brillouin amplification and lasing in a single-mode As₂Se₃ chalcogenide fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(11):1615~1617
- 88 G. Qin, A. Mori, Y. Ohishi. Brillouin lasing in a single-mode tellurite fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(15):2179~2181
- 89 S. W. Harun, S. Shahi, H. Ahmad. Compact Brillouin-erbium fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(1):46~48
- 90 H. Ahmad, S. Shahi, S. W. Harun. Multi-wavelength laser generation with bismuth-based erbium-doped fiber [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(1):203~207
- 91 S. W. Harun, S. N. Aziz, N. Temchek *et al.*. Brillouin fibre laser with 20 m-long photonic crystal fibre [J]. *Electron. Lett.*, 2008, **44**(18):1065~1066
- 92 M. Salhi, A. Hindeur, T. Chtier *et al.*. Evidence of Brillouin scattering in an ytterbium-doped double-cald fiber laser [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(15):1294~1296
- 93 P. Dainese, P. St. J. Russell, N. Joly *et al.*. Stimulated Brillouin scattering from multi-GHz-guided acoustic phonons in nanostructured photonic crystal fibres [J]. *Nature Phys.*, 2006, **2**:388~392
- 94 Zhou Tao, Chen Jun, Tang Chun *et al.*. Experimental study on optical tapered fiber phase-conjugator in MOPA system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):471~474
周涛,陈军,唐淳等. 主振荡功率放大激光器中锥度光纤相位共轭镜的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4):471~474
- 95 B. C. Rodgers, T. H. Russell, W. B. Rob. Laser beam combining and cleanup by stimulated Brillouin scattering in a

- multimode optical fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(16):1124~1126
- 96 A. A. Fotiadi, P. Megret, M. Blondel. Dynamics of a self-Q-switched fiber laser with a Rayleigh-stimulated Brillouin scattering ring mirror [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(10):1078~1080
- 97 Lü Yuelan, Lü Zhiwei, Yang Jun *et al.*. Optical limiting of Nd:YAG nanosecond laser pulses by stimulated Brillouin scattering in single-mode fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(11):998~1002
- 吕月兰, 吕志伟, 杨珺等. 单模光纤中受激布里渊散射对纳秒激光脉冲的光限幅特性[J]. *中国激光*, 2003, **30**(11):998~1002
- 98 R. K. Kadiwar, I. P. Giles. Optical fibre Brillouin ring laser gyroscope [J]. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(25):1729~1731
- 99 A. Loayssa, D. Benito, M. J. Garde. Optical carrier-suppression technique with a Brillouin-erbium fiber laser [J].

- Opt. Lett.*, 2000, **25**(4):197~199
- 100 D. L. Butler, J. S. Wey, M. W. Chbat *et al.*. Optical clock recovery from a data stream of an arbitrary bit rate by use of stimulated Brillouin scattering [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(6):560~562
- 101 Zhang Feng, Chen Ming, Qin Xi *et al.*. All optical clock recovery from degraded non-return-to-zero data stream [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8):1101~1105
- 张峰, 陈明, 秦曦等. 恶化非归零码信号的全光时钟恢复[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8):1101~1105
- 102 X. S. Yao. High-quality microwave signal generation by use of Brillouin scattering in optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(17):1329~1331
- 103 J. Geng, S. Staines, S. Jiang. Dual-frequency Brillouin fiber laser for optical generation of tunable low-noise radio frequency/microwave frequency [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(1):16~18

1.8 kW 全固态激光器 200 μm 光纤耦合输出

全固态激光器(DPSSL)具有体积小、重量轻、效率高、性能稳定、可靠性好、寿命长及光束质量高等优点,全固态激光与光纤传输系统的组合提高了激光加工的自动化和柔性。目前,高光束质量、高功率、高效率、高稳定性的全固态激光加工系统已经成为工业激光加工领域追逐的热点。

本实验利用自主研制的高功率激光模块,通过单级振荡加三级放大输出,最高功率达 1882 W,经芯径 200 μm 的石英光纤耦合输出,输出功率为 1850 W,其抽运电功率、输出功率以及耦合效率曲线如图 1 所示(其中 P_{in} 为进光纤功率, P_{out} 为出光纤功率)。目前,该实验的工程化机器已经研制完毕,将定位于工业加工中的金属薄板的切割和焊接应用。

王宝华 刘永刚 侯玮 林学春 李晋闯
(中国科学院半导体研究所,北京 100083)

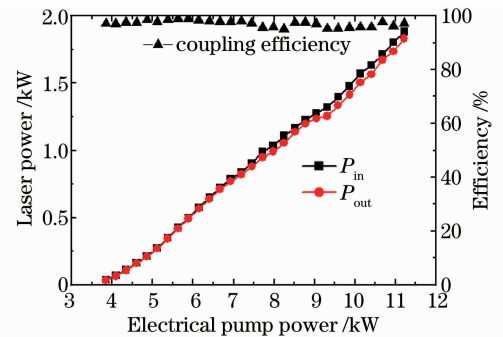


图 1 单级振荡加三级放大后的输出功率及经芯径 200 μm 光纤耦合效率

Fig. 1 Output power of single rod-based-oscillator following by three rod-based-amplifiers and the coupling efficiency of 200 μm core-diameter fiber