

## 超窄线宽布里渊光纤激光器研究进展 (特邀)

陈 默, 王建飞, 路 阳, 胡晓阳, 陈 伟, 孟 洲\*

(国防科技大学 气象海洋学院, 湖南长沙 410073)

**摘 要:** 基于光纤受激布里渊散射的布里渊光纤激光器以其 Hz 量级甚至亚 Hz 量级的超窄线宽特性, 自问世以来便吸引了广泛的研究关注。超窄线宽布里渊光纤激光器主要经历三个发展阶段, 从最初的基于单模光纤谐振腔的布里渊光纤激光器, 到向腔内引入掺铒光纤放大器的布里渊掺铒光纤激光器, 再到利用一段普通掺铒光纤同时提供布里渊增益与线性增益的紧凑型布里渊掺铒光纤激光器, 激光器的性能不断得到发展, 相关理论研究也不断得到丰富。近 10 年, 紧凑型布里渊掺铒光纤激光器的研究取得了一系列的进展, 在高精度光纤传感等诸多领域有着十分重要的应用前景。按照三个发展阶段依次梳理和总结了布里渊光纤激光器的研究进展, 重点阐述了紧凑型布里渊掺铒光纤激光器的机理、特性和应用, 并对其未来发展方向进行展望。

**关键词:** 光纤激光; 超窄线宽; 单频; 掺铒光纤; 受激布里渊散射

**中图分类号:** TN248      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20230131

### 0 引 言

超窄线宽 (~ kHz) 激光器是激光技术领域长期以来重要的研究热点之一<sup>[1-2]</sup>。光学精密测量、光学传感、相干光通信、原子光钟等诸多领域对超窄线宽激光器有着迫切的需求<sup>[3-4]</sup>。线宽直接影响这些系统的测量精度、检测灵敏度或通信距离等性能参数。

目前, 光纤系统中普遍使用的超窄线宽激光器主要有固体激光器、半导体激光器 (LD) 和掺铒光纤激光器 (EDFL)。受限于增益介质, 固体激光器的输出波长通常为 1.0  $\mu\text{m}$  或 1.3  $\mu\text{m}$ , 难以应用于 C 波段光通信/传感系统中<sup>[5]</sup>。由于分布布拉格光栅反射或分布式反馈技术的发展应用, 半导体激光器的线宽从最初的几十 MHz 降低至数十 kHz 量级<sup>[6-7]</sup>。特别是外腔式半导体激光器成功实现了 ~3 kHz 的线宽<sup>[8]</sup>, 可以与光纤激光器的线宽媲美。但是, 基于电流调谐的半导体激光器的快速调谐稳定性较差, 非常不利于在基于相位产生载波技术 (PGC) 的干涉型光纤传感系统中的应用。掺铒光纤激光器的线宽在 kHz 量级, 而且

具有激光转换效率大、功率高、易与光纤系统兼容的特点, 在各种光纤系统中得到广泛应用<sup>[9-12]</sup>。掺铒光纤的增益谱较宽 (~40 nm), 需要各种线宽压缩技术以抑制跳模, 实现单频输出, 如 Pound-Drever-Hall 主动控制法<sup>[13]</sup>、饱和吸收体法<sup>[14]</sup> 和缩短腔长法<sup>[15]</sup> 等。但是主动控制电路会引入额外的噪声, 短腔长结构需要高掺杂特种光纤, 基于饱和吸收体的 EDFL 的中心频率稳定性较差。EDFL 的线宽很容易达到 kHz 量级, 若想进一步实现 Hz 量级的线宽, 则需要十分复杂精密的技术与条件。比如采用电路反馈/前馈控制结构<sup>[16-17]</sup>, 将激光频率锁定于一个高精度 Fabry-Perot 腔的谐振频率<sup>[18]</sup>。或者通过光学频率梳与稳腔激光器进行相位锁定<sup>[19]</sup>。这些技术各自具有一定局限性: 受限于反馈环路稳定性, 电路反馈/前馈控制技术的工作带宽较窄; 基于超稳 Fabry-Perot 腔的稳频技术需要腔具有极好的隔热隔振能力, 要求精细设计和实现腔的对称性和稳定性。

光纤中受激布里渊散射 (SBS) 是一种重要的光纤非线性效应, 可用于窄带光放大或者是产生超窄线

收稿日期: 2023-03-10; 修订日期: 2023-04-27

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB3205302); 国家自然科学基金项目 (61705263)

作者简介: 陈默, 女, 副研究员, 博士, 主要从事光纤传感方面的研究。

通讯作者: 孟洲, 女, 教授, 博士, 主要从事光纤传感方面的研究。

宽激光<sup>[20]</sup>。基于光纤 SBS 的布里渊光纤激光器 (BFL), 具有独特的线宽压缩特性, 产生的超窄线宽激光可窄至 Hz 甚至亚 Hz 量级。1976 年首台 BFL 被报道, 至今经过了近 50 年的发展, 取得了一系列进展。超窄线宽布里渊光纤激光器的发展过程主要经历了三个阶段。最初的 BFL, 基于单模光纤组成的谐振腔, 要么需要高泵浦功率 (几百 mW 甚至上 W)<sup>[21-22]</sup> 要么需要反馈控制电路以保证泵浦光精确满足耦合谐振条件<sup>[23-24]</sup>。为了克服泵浦耦合条件, 且不增加布里渊泵浦 (BP) 阈值, 研究人员在腔内引入掺铒光纤放大器, 构造了布里渊掺铒光纤激光器 (BEFL)<sup>[25-28]</sup>, 即布里渊光纤激光器发展的第二个阶段。BEFL 克服了泵浦耦合谐振条件, 且具有低阈值 (~mW) 与较高功率 (~10 mW) 的优势。但是 BEFL 腔长较长 (超过百米), 容易导致激光跳模。采用高掺杂特种光纤缩短腔长, 又导致激光器阈值较高 (>100 mW) 和功率较低 (~mW) 等其他问题<sup>[29-31]</sup>。如何在克服泵浦耦合条件的条件下实现短腔 (<10 m)、低阈值 (~mW) 的超窄线宽 BFL 成为限制其进一步发展的瓶颈。研究人员针对这个问题开展深入研究, 提出了几种解决方案, 攻克了相关技术难题。最终在无需复杂的电路反馈控制技术或精密的温度隔离封装措施条件下, 实现了 Hz 量级的超窄线宽布里渊光纤激光器, 即基于普通掺铒光纤的紧凑型 BEFL<sup>[32-35]</sup>。这种基于普通掺铒光纤同时提供布里渊增益与线性增益的紧凑型 BEFL 是超窄线宽布里渊光纤激光器发展的第三个阶段, 也是目前的研究前沿与热点之一, 有望在各种高相干光学领域发挥重要的作用。

文中对超窄线宽布里渊光纤激光器的研究进展进行总结, 按照三个阶段梳理其发展过程, 阐述各发展阶段布里渊光纤激光器的结构、机理与特性, 重点分析了紧凑型布里渊掺铒光纤激光器, 概述了这种新型布里渊光纤激光器的应用, 并对它的未来发展方向进行了展望。

## 1 早期的布里渊光纤激光器发展过程

### 1.1 首台 BFL

SBS 过程是一个增益过程, 利用 SBS 可以构建布里渊放大器与布里渊激光器。1976 年, K. O. Hill 等人报道了首台 BFL<sup>[21]</sup>。结构如图 1 所示, 它采用环形

腔结构, 利用 9.5 m 单模光纤作为布里渊增益介质, 实现了单纵模布里渊激光输出。受限于当时的光纤元器件技术和光纤熔接技术, 这台 BFL 不完全是全光纤结构, 包含了部分的空间光传输结构。

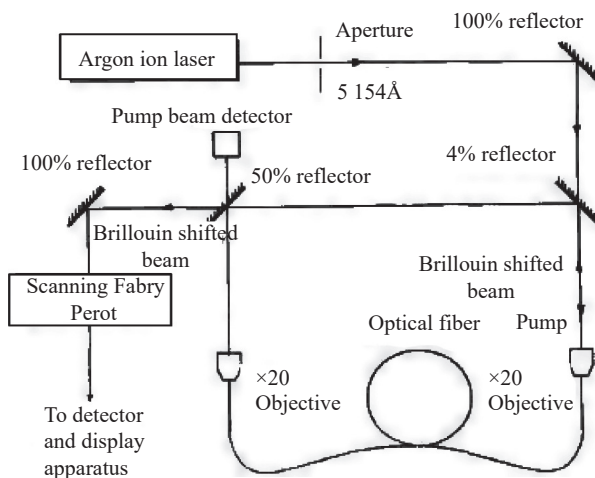


图 1 首台布里渊光纤环形激光器结构原理图<sup>[21]</sup>

Fig.1 Schematic of the first Brillouin ring laser<sup>[21]</sup>

光纤的布里渊增益谱宽通常在 10~30 MHz 之间, 典型值为 20 MHz。这台 BFL 采用 9.5 m 单模光纤作为布里渊增益介质, 布里渊增益谱内仅存在 1 个纵模, 保证激光器为单纵模状态。但是短增益介质需要高的布里渊泵浦功率。其 BFL 的布里渊阈值为 250 mW。较高的布里渊泵浦不利于 BFL 的应用。

### 1.2 泵浦耦合谐振的 BFL

由于单模光纤的布里渊增益系数较小, 布里渊泵浦光单次通过单模光纤激发 SBS 的效率不高, 导致布里渊泵浦阈值较大。如果满足泵浦耦合谐振条件, 泵浦光能够在谐振腔内谐振。布里渊泵浦光在腔内反复循环多次放大布里渊 Stokes 光, 布里渊泵浦光的利用效率得到提高, 相应地泵浦阈值就得以降低<sup>[23,36]</sup>。实现泵浦耦合谐振需要满足下列两个条件其中之一<sup>[36]</sup>:

$$\beta L = q2\pi - \pi/2 \quad (1)$$

$$k_r = (1 - \gamma_0) \exp(-\alpha L) \quad (2)$$

式中:  $\beta$  为光纤中光波的传输常数;  $L$  为光纤谐振腔长度;  $q$  为任意整数;  $k_r$  为耦合系数;  $\gamma_0$  为耦合器的耦合强度系数;  $\alpha$  为 2 倍光纤振幅损耗系数。根据上述两个公式可知, 为了满足泵浦耦合谐振条件, 可以通过调制泵浦光频率或者调节谐振腔长度, 也可以通过使

用耦合系数可变的耦合器改变腔的输出耦合系数。通常采用反馈控制电路对谐振腔长度或者泵浦光频率进行实时调节。

1991 年, S. P. Smith 等人报道了一个本征线宽小于 30 Hz 的布里渊光纤激光器, 结构如图 2 所示<sup>[23]</sup>。它使用反馈控制电路调节泵浦光的频率, 使得布里渊泵浦光频率位于腔的谐振中心, 即布里渊泵浦光在腔内谐振。由于满足泵浦耦合谐振条件, 泵浦光反复通过单模光纤对布里渊 Stokes 光进行布里渊放大, 因此该 BFL 需要很低的泵浦光功率, 布里渊阈值仅为 120 μW。

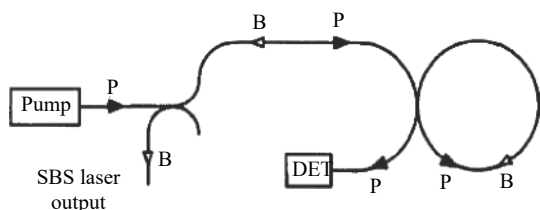


图 2 基于泵浦光频率调制的 BFL 结构原理简图<sup>[23]</sup>

Fig.2 Simplified schematic of narrow-linewidth BFL with pump frequency tracking circuit<sup>[23]</sup>

1994 年, J. Boschung 等人报道了一个对腔长进行调节以实现泵浦耦合谐振条件的布里渊光纤环形激光器。结构如图 3 所示<sup>[24]</sup>, 通过使用电路控制压电陶瓷环调节腔长, 保证泵浦光在腔内谐振。此 BFL 的泵浦阈值为 400 μW, 线宽为 3 Hz。

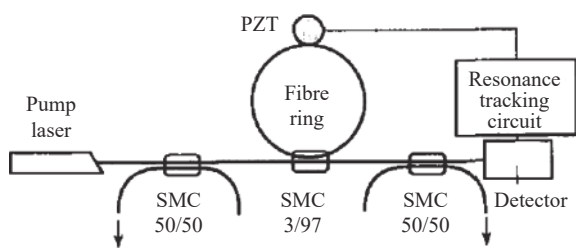


图 3 基于腔长调制的 BFL 结构原理简图<sup>[24]</sup>

Fig.3 Simplified schematic of narrow-linewidth BFL with resonance tracking circuit<sup>[24]</sup>

综上所述, 泵浦耦合谐振的 BFL 泵浦阈值很低, 仅为百 μW 量级。相比首台 BFL 数百毫瓦的泵浦阈值, 满足泵浦耦合谐振条件能使 BFL 的泵浦阈值大幅减小。但是额外的控制电路增加了 BFL 的复杂度和实现难度, 同时电路系统也会向 BFL 引入额外的附加噪声。这是泵浦耦合谐振条件对 BFL 的不利影响。

另外, 需要说明的是 BFL 不仅可以作为单频激光源, 也可以实现多波长激光输出。随着泵浦功率的增加, 当一阶 Stokes 光功率超过一定阈值, 二阶 Stokes 光会被激发。如果泵浦功率足够高, 激发级联 SBS, 会产生更高阶的 Stokes 光, BFL 即可实现频率间隔相等的多波长激光输出, 各相邻波长之间的频率间隔为布里渊频移。多波长布里渊光纤激光器也是一个非常重要的研究方向, 几十年来吸引了大量研究关注, 取得了很多的研究成果<sup>[37-39]</sup>。文中仅讨论单波长布里渊激光器。

### 1.3 BFL 的线宽压缩

BFL 具有独特的超窄线宽特性, 布里渊泵浦光转换为布里渊激光后, 线宽被大幅压缩。例如图 2 中的 BFL 线宽为 30 Hz, 它的布里渊泵浦光线宽为 120 kHz。图 3 中的 BFL 线宽为 3 Hz, 它的泵浦线宽为 100 kHz。线宽压缩系数四五个数量级。

2000 年, Alexis Debut 等人利用 SBS 的动态耦合波模型进行推导, 并建立了布里渊光纤激光器的线宽压缩理论。分析结果表明, 布里渊光纤激光器的线宽压缩是由于声子的衰荡和腔的反馈两者共同作用的结果。布里渊泵浦线宽与布里渊 Stokes 线宽之间的关系式如下<sup>[40-41]</sup>:

$$\Delta\nu_s = \frac{\Delta\nu_p}{\left(1 + \frac{\gamma_A}{\Gamma_c}\right)^2} \quad (3)$$

式中:  $\Delta\nu_s$  和  $\Delta\nu_p$  是布里渊激光线宽和布里渊泵浦线宽;  $\gamma_A$  为声子衰荡速率, 由布里渊增益谱宽  $\Delta\nu_B$  决定, 等于  $\pi\Delta\nu_B$ ;  $\Gamma_c$  为腔的损耗率, 表达式是  $-c\ln r/nL$ ,  $c/n$  是光在光纤中的速率,  $r$  是腔的光振幅反馈系数,  $L$  是光纤长度。由公式 (3) 可知, 布里渊光纤激光器的线宽压缩能力是由声子的衰荡和腔的反馈共同决定。声子寿命由光纤材料本身决定, 腔反馈系数则可以通过人为控制。腔的反馈系数越高 (即精细度越大), 越能实现强烈的线宽压缩。对于一个全光纤谐振腔, 精细度很容易达到 100 的量级, 线宽压缩系数很容易达到  $10^4$  量级<sup>[40]</sup>。

### 1.4 BFL 的商业化进展

美国 NP 光电子公司于 2006~2007 年相继报道了基于 Pound-Drever-Hall 主动稳频技术的 BFL 激光器, 输出功率可达 100 mW, 线宽为 200 Hz<sup>[42-43]</sup>。其结构

原理如图 4 所示。该激光器是一台泵浦耦合谐振的 BFL。为了避免腔长调制可能导致的激光器线宽恶化, NP 公司采取泵浦频率调制的方式。基于 Pound-Drever-Hall 主动稳频技术, 使用快速反馈电路将泵浦激光器频率锁定在腔的谐振频率中心。该 BFL 的腔长为 20 m 左右, 考虑到光纤布里渊增益谱谱宽在 10~30 MHz 范围之间, 这样 BFL 的自由光谱程与增益谱宽相当, 可以保证单纵模运转。同时整个光纤激光腔进行了温度控制与防震封装, 可以防止激光器中心频率的慢漂和外界振动导致的突然跳模。

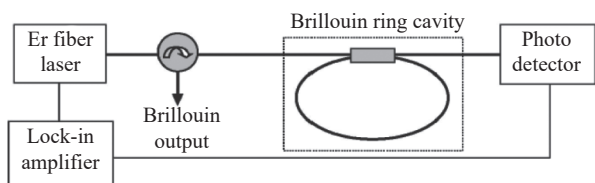


图 4 主动稳频布里渊光纤激光器<sup>[42]</sup>

Fig.4 Actively stabilized Brillouin fiber ring laser<sup>[42]</sup>

此激光器做成产品投入市场, 受泵浦耦合谐振条件的限制, 激光器尺寸较大 (471 mm×362 mm×204 mm), 一定程度上限制了其应用范围。与其它的商业化激光器相比, 比如 RIO 公司的半导体超窄线宽激光器模块 (线宽~3 kHz)<sup>[8]</sup> 和 NKT 公司的超窄线宽掺铒光纤激光器模块 (线宽~1 kHz) 的应用范围更广泛。如何实现低阈值且无需泵浦耦合谐振条件的 BFL 是布里渊光纤激光器进一步发展的方向。

## 2 布里渊掺铒光纤激光器发展过程

受限于其结构和固有机理, 最初的 BFL 发展进入瓶颈阶段。随着布里渊掺铒光纤激光器的出现, 布里渊光纤激光器进入到了一个新的发展阶段。

### 2.1 首台布里渊掺铒光纤激光器

为了克服泵浦耦合谐振条件, 降低布里渊光纤激光器的实现难度, 研究人员做了大量研究工作。1996 年, G. J. Cowle 等人提出了一种新型的布里渊光纤激光器, 结构原理如图 5 所示, 并相继发表一系列的研究成果<sup>[25-28]</sup>。在传统 BFL 腔内引入一个掺铒光纤放大器 (EDFA) 补偿腔损, 从而可以克服泵浦耦合谐振条件, 这种新型的布里渊激光器被命名为布里渊掺铒光纤激光器。它结合了掺铒光纤中的线性增益和单

模光纤中的布里渊增益, 同时具有传统布里渊光纤激光器的超窄线宽特性以及掺铒光纤激光器阈值低、功率高、易于实现的优势。

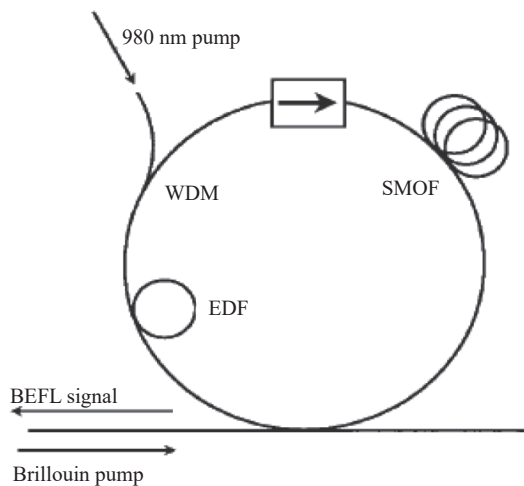


图 5 布里渊掺铒光纤激光器结构原理图<sup>[26]</sup>

Fig.5 Configuration of Brillouin/erbium fiber laser<sup>[26]</sup>

它的具体工作原理是布里渊泵浦光首先注入腔内的单模光纤上, 在单模光纤上激发 SBS 并产生后向布里渊 Stokes 光; 布里渊 Stokes 光经单模光纤的布里渊增益放大后, 一部分经耦合器输出, 一部分进入掺铒光纤中被线性放大, 经布里渊增益和线性增益这两种增益作用放大后, 布里渊 Stokes 光又进入单模光纤中继续被布里渊增益放大; 布里渊 Stokes 光在腔内反复受到两种增益的放大作用, 最终形成谐振产生激光。BEFL 的波长由布里渊增益谱决定, 与布里渊泵浦光波长相差约 0.086 nm, 如图 6(a) 所示。激光功率由掺铒光纤增益决定, 超过阈值后, BEFL 功率随 980 nm 泵浦功率线性增加, 如图 6(b) 所示。980 nm 泵浦阈值功率用来克服腔损, 由于全光纤腔的腔损很小, 980 nm 泵浦阈值仅为几 mW。布里渊泵浦阈值也很低, 实验表明 2.6 mW 的布里渊泵浦光即可使得 BEFL 稳定运转。

BEFL 相比 BFL 更易实现, 不需要苛刻的泵浦耦合谐振条件, 且泵浦光阈值很低。但是由于单模光纤的布里渊增益系数较小 ( $\sim 2 \times 10^{-11}$  m/W), BEFL 需要较长的单模光纤 (100 m) 以保证足够的布里渊增益。长单模光纤导致布里渊增益谱远大于腔的自由光谱程, 增益谱内存在较多的纵模模式。虽然布里渊增益的均匀展宽特性可以保证激光器主要运转于单纵模状

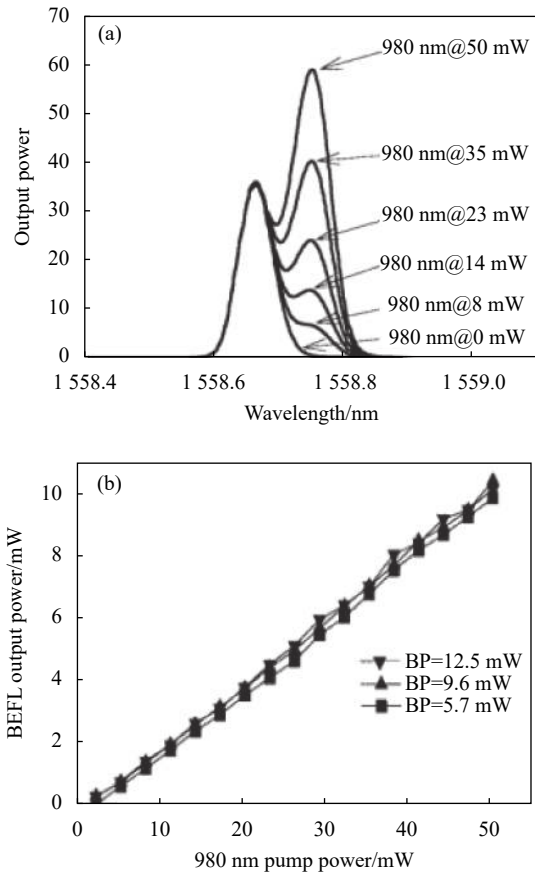


图 6 不同 980 nm 泵浦功率下的布里渊掺铒光纤激光器, (a) 光谱, (b) 输出功率<sup>[26]</sup>

Fig.6 (a) Optical spectra and (b) Output power of Brillouin/erbium fiber laser with different 980 nm pump power<sup>[26]</sup>

态,但是不可避免地受到环境扰动而跳模。研究人员相继开展单纵模 BEFL 的研究。

## 2.2 单纵模 BEFL 发展过程

### 2.2.1 基于多级环形腔的单纵模 BEFL

2008 年,中国科学院半导体所的陈伟等人报道了一种单纵模 BEFL,其结构如图 7 所示<sup>[44]</sup>。采用 500 m 单模光纤作为布里渊增益介质,产生布里渊激光。腔长为 0.4 m 和 3.2 m 的两个辅环形腔用于增大激光腔的自由光谱范围,实现大于布里渊增益谱宽的模式间隔。跳模被有效抑制,实现了线宽为 1.5 kHz 的单纵模 BEFL。

这种方案虽然可以抑制跳模,但是它需要结合光纤布拉格光栅可调谐滤波器和窄带布里渊增益选模以及多级环形腔增加谐振腔模式间隔几种手段,还要对布里渊抽运波长进行精细调节使其与 BEFL 的腔长相匹配,结构较为复杂,需要控制的参量过多,不利

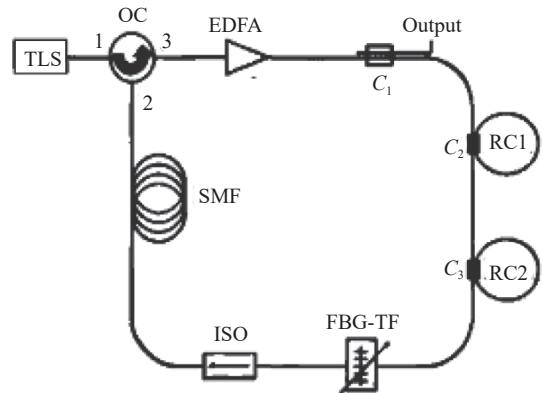


图 7 多环形腔单纵模布里渊掺铒光纤激光器<sup>[44]</sup>

Fig.7 Single-mode multi-resonance-cavity BEFL<sup>[44]</sup>

于实际应用。

### 2.2.2 基于高非线性特种光纤的短腔 BEFL

要实现单纵模 BEFL,最直接有效的方法是缩短腔长。由于单模光纤的增益系数较小,研究人员首先考虑使用高非线性系数的特种光纤,比如光子晶体光纤、As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 光纤和掺铋掺铒光纤,将这些特种光纤作为布里渊增益介质,可以缩短增益介质长度,实现短腔 BEFL。

2008 年,马来西亚的 S. W. Harun 等人利用 20 m 的光子晶体光纤作为布里渊增益介质,有效缩短了 BEFL 的腔长<sup>[45]</sup>。2009 年,该团队利用长度仅为 2.15 m 的高掺杂(铒离子浓度 3200 ppm)、高非线性系数(60(W·km)<sup>-1</sup>)的掺铋掺铒光纤同时作为布里渊增益和线性增益介质,实现了紧凑型 BEFL,其结构原理如图 8 所示<sup>[46]</sup>。采用这些特殊光纤的 BEFL 腔长得到大幅缩短,但是由于这些光纤本身的损耗以及与其它光纤熔接的损耗较大,相应的导致 BEFL 输出功率较低(2 dBm)、泵浦阈值功率较高(>100 mW)。同年,该团

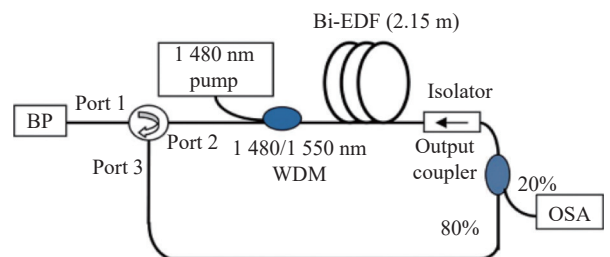


图 8 基于掺铋掺铒光纤的紧凑型 BEFL 结构原理图<sup>[46]</sup>

Fig.8 Configuration of compact BEFL based on Bi-based erbium-doped fiber<sup>[46]</sup>

队将掺铋掺铟光纤的长度进一步缩短至 49 cm<sup>[47]</sup>。但是仅有光谱与功率特性的报道,未见线宽或相位噪声等性能的研究报道。

### 2.2.3 基于常规光纤的超短腔 BEFL

采用高非线性特种光纤的 BEFL 具有实现较难、输出功率较低、光信噪比不高等不足,因此迫切需要实现基于常规光纤的超短腔 BEFL。如何利用常规光纤实现低阈值、短腔 BEFL 成为研究者面临的难题。

2011 年,国防科技大学的周会娟等人另辟蹊径,利用泵浦预放大技术实现了低阈值、超短腔 BEFL,结构如图 9 所示<sup>[48]</sup>。作为布里渊增益介质的单模光

纤长度仅为 5 m,考虑掺铟光纤放大器中的铟纤以及连接光纤的长度,激光器总腔长小于 10 m。泵浦预放大 BEFL 的特别之处在于腔内的掺铟光纤放大器位于单模光纤之前。进入腔内的布里渊泵浦光首先经 EDFA 放大,再进入单模光纤激发 SBS。虽然外部布里渊泵浦光功率较低,但是经 EDFA 放大后实际注入到单模光纤上的功率增高,从而产生较大的布里渊增益。此 BEFL 全部基于常规光纤,且具有低阈值和较高输出功率的优良特性。实验结果证明该激光器具有单纵模、低阈值 (~20 mW) 和高功率 (>10 mW) 的特性。

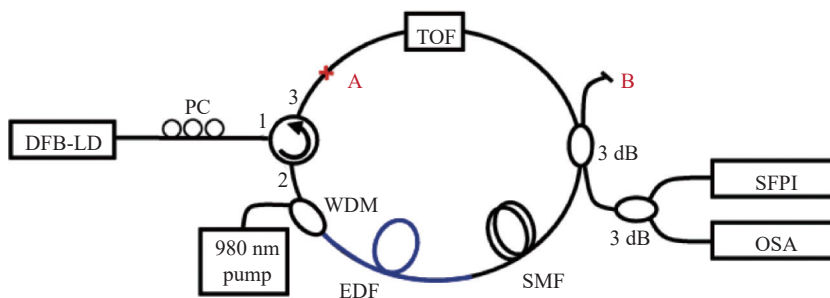


图 9 基于泵浦预放大的单纵模 BEFL 结构示意图<sup>[48]</sup>

Fig.9 Configuration of single-mode BEFL based on BP pre-amplification<sup>[48]</sup>

2012 年,该团队进一步大胆提出使用一段普通掺铟光纤同时提供布里渊增益与线性增益的新方法构造超短环形腔 BEFL,其结构如图 10 所示<sup>[49]</sup>。利用 4 m 的掺铟光纤作为混合增益介质,实现了低 980 nm 泵浦阈值 (<20 mW)、高输出功率 (>10 mW) 的单频 BEFL。相比基于泵浦预放大的 BEFL,这种 BEFL 结构更简单且紧凑。虽然文献中未针对其线宽进行测

量,但其稳定的单纵模特性得到验证。该 BEFL 的实现是单频、超窄线宽 BEFL 研究的一个十分重要的发展节点,它使得低阈值、超窄线宽、超短腔、紧凑型 BEFL 成为现实。

### 3 紧凑型 BEFL 研究进展

基于一段数米普通掺铟光纤的紧凑型 BEFL 突破了传统 BEFL 难以同时具有超短腔与低阈值的限制,成为了超窄线宽布里渊光纤激光器发展的第三阶段。自问世以后,其独特的机理、优良的特性使其成为超窄线宽 BEFL 研究的热点与前沿。近 10 年来,超窄线宽 BEFL 的研究主要围绕此类型的 BEFL 展开。

2013 年,国防科技大学在之前的研究基础上进一步提出了全保偏结构的紧凑型 BEFL,结构如图 11 所示<sup>[32]</sup>。针对这种结构的超窄线宽激光器的功率、线宽、噪声、快速调谐等特性开展了一系列理论与实验研究。

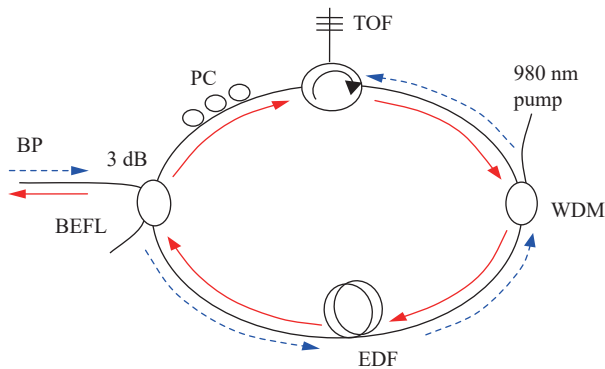


图 10 超短环形腔、紧凑型 BEFL 结构示意图<sup>[49]</sup>

Fig.10 Configuration of ultra-short-ring-cavity compact BEFL<sup>[49]</sup>

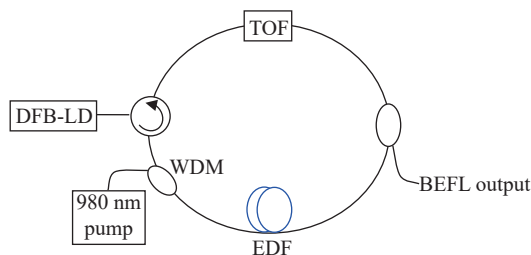


图 11 全保偏、超短环形腔、紧凑型 BEFL 结构图<sup>[32]</sup>

Fig.11 Configuration of all-polarization-maintained ultra-short-ring-cavity compact BEFL<sup>[32]</sup>

### 3.1 紧凑型 BEFL 的超窄线宽特性

#### 3.1.1 超窄线宽特性

2014 年开始,国防科技大学对紧凑型 BEFL 的超窄线宽特性开展研究。采用 25 km 延时自外差方法测量并估算得到紧凑型 BEFL 的线宽为 950 Hz<sup>[33]</sup>。延时自外差技术的测量精度有限,外差法的精度不受

限于延时光纤,但是外差法需要与被测激光线宽相当的参考光。实际中较难找到一台线宽和 BEFL 接近的本地参考光源。

2015 年,该研究团队设计了如图 12 所示的实验系统,使用外差法对紧凑型 BEFL 的线宽进行测量<sup>[34]</sup>。布里渊泵浦光经耦合器分束,并分别经 25 km 延时光纤进行延时以及声光调制器 (AOM) 进行移频。两束不相关且具有 300 MHz 频移的光通过耦合器合束后,进入 BEFL 腔内作为布里渊泵浦光并产生两束不相关的布里渊激光。由于激发这两束布里渊激光的泵浦光来自于同一台激光器,且这两束布里渊激光在同一个谐振腔内产生,因此它们的线宽相同。这两束激光经过输出耦合器合束后进入光电探测器得到拍频信号,并经电谱分析仪进行分析,得到拍频信号如图 13 所示。拍频信号的 20 dB 线宽为 800 Hz,因此得到 BEFL 的线宽为 40 Hz。

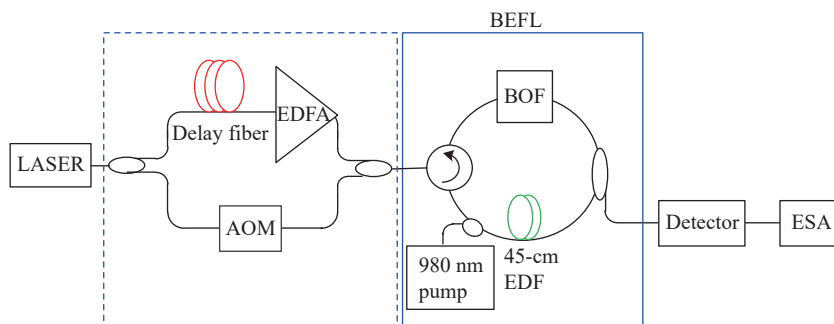


图 12 紧凑型 BEFL 的外差法线宽测试系统示意图<sup>[34]</sup>

Fig.12 Heterodyne setup for compact BEFL linewidth measurement<sup>[34]</sup>

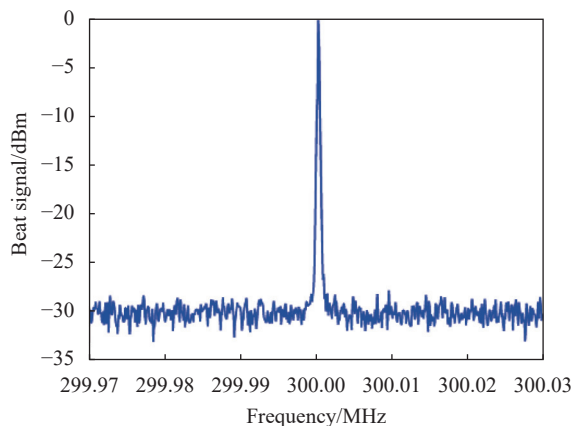


图 13 紧凑型 BEFL 的外差拍频信号谱<sup>[34]</sup>

Fig.13 Heterodyne beat spectrum of compact BEFL<sup>[34]</sup>

同年,研究团队还研究了 Voigt 拟合的超窄线宽测量法以估算 BEFL 的超窄线宽<sup>[35]</sup>。理论上延时自外差技术中的延时光纤越长,线宽测量的分辨率越高,越有利于超窄线宽的准确测量。实际上,测量得到的拍频谱是激光器的洛伦兹谱与  $1/f$  噪声的高斯谱的卷积。自外差谱受  $1/f$  噪声影响被明显展宽,且延时光纤越长  $1/f$  噪声的影响越严重。Voigt 拟合法可以分离自外差谱中的高斯谱成分与洛伦兹谱成分,有效去除  $1/f$  噪声对谱的展宽作用,充分发挥长延时光纤提高测量精度的作用。

图 14 为紧凑型 BEFL 的 25 km 延时光纤自外差谱和 Voigt 拟合谱。洛伦兹谱宽为 50 Hz 的 Voigt 线

型能很好地拟合自外差谱线,即 BEFL 的洛伦兹线宽为 50 Hz,与图 13 中外差法测量得到结果吻合的较好。当延时光纤为 100 km 时,延时自外差谱能被高斯线型很好拟合,说明此时谱线中几乎不含洛伦兹成分。从数学上可以认为洛伦兹线宽~0 Hz;从实际上可推断出 BEFL 的线宽远小于 50 Hz。

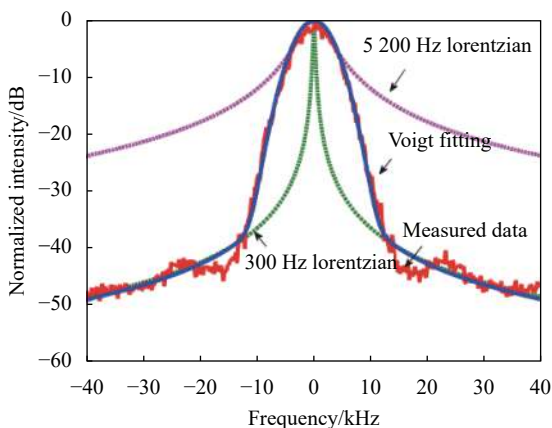


图 14 紧凑型 BEFL 的 25 km 延时自外差谱及拟合曲线<sup>[35]</sup>

Fig.14 25-km-delayed self-heterodyne spectrum of compact BEFL and the fitting curves<sup>[35]</sup>

2017 年,该研究团队更进一步使用同一布里渊泵浦光分束后泵浦两台紧凑型 BEFL 的方案测量 BEFL 的超窄线宽,实验系统如图 15 所示<sup>[50]</sup>。采用相同的掺铒光纤作为增益介质,两台 BEFL 具有相同的布里渊频移,且具有接近的超窄线宽。一台半导体激光器经耦合器分束后分别作为泵浦光对两台 BEFL 进行泵浦,其中一台 BEFL 的输出经 AOM 产生 300 MHz 的移频后与另一台 BEFL 的输出合束产生拍频信号,经光电探测和电谱分析仪后如图 16 所示。拍频信号的 3 dB 谱宽为 6 Hz,因此紧凑型 BEFL 的洛伦兹线宽为 3 Hz。该结果也验证了 100 km 延时光纤自外差谱的 Voigt 拟合分析结果。

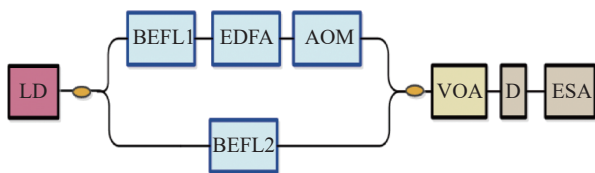


图 15 两台紧凑型 BEFL 的外差测试系统<sup>[50]</sup>

Fig.15 Heterodyne setup of two compact BEFLs<sup>[50]</sup>

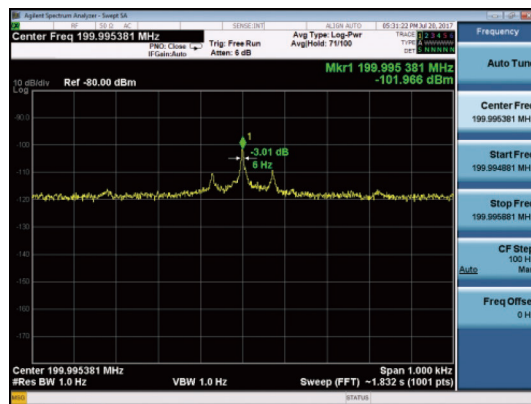


图 16 两台紧凑型 BEFL 的拍频信号<sup>[50]</sup>

Fig.16 Heterodyne beat note of two compact BEFLs<sup>[50]</sup>

### 3.1.2 线宽压缩特性

紧凑型 BEFL 的超窄线宽输出均是在较大的布里渊泵浦线宽条件下实现的。比如图 13 的结果是在 20 MHz 的布里渊泵浦条件下,图 16 是在 360 kHz 的布里渊泵浦条件下, BEFL 相比布里渊泵浦光线宽被压缩了 5 个数量级。

BEFL 具有强烈的线宽压缩特性,它能够将相干性能较低的布里渊泵浦光转化为高相干的布里渊 Stokes 激光。这种强烈的线宽压缩是布里渊光纤激光器天然具有的能力,它是由声子的寿命和腔的反馈共同决定。BEFL 的线宽压缩系数如下<sup>[34]</sup>:

$$\Delta\nu_s = \frac{\Delta\nu_p}{\left(1 + \frac{\gamma_A}{\Gamma_c}\right)^2} = \frac{\Delta\nu_p}{\left(1 + \frac{\pi\Delta\nu_B}{-c \ln(rg)/nL}\right)^2} \quad (4)$$

式中:  $\Delta\nu_s$  和  $\Delta\nu_p$  为布里渊激光线宽和布里渊泵浦线宽;  $\Delta\nu_B$  为布里渊增益谱宽;  $c/n$  为光在光纤中的速率;  $r$  为腔的光振幅反馈系数;  $g$  为由线性增益引起的光振幅增益;  $L$  为光纤长度。公式 (4) 与公式 (3) 几乎相同,仅腔的损耗率  $\Gamma_c$  含义不同。因为 BEFL 腔内还有线性增益的作用,要考虑线性放大导致的振幅增益  $g$ ,因此  $\Gamma_c$  等于  $-c \ln(rg)/nL$ 。

理想的情况下,当 BEFL 发生激光谐振时光损耗等于增益,即理论上线宽压缩系数为  $\infty$ 。由于自发辐射噪声等影响,不可能达到无穷,但仍可达到较高的量级。以  $rg=0.994$  为例,增益光纤长 4 m,布里渊增益谱宽为 35 MHz,计算可得  $\sim 10^5$  的线宽压缩系数。与 BFL 相比,传统 BFL 提高腔的精细度要在一定程度上牺牲激光输出功率。而 BEFL 由于腔内的线性



增益的作用,提高布里渊 Stokes 光功率的同时提高腔的精细度,因此能在保证较高输出功率的同时具有更高的线宽压缩能力。

值得指出的是,理论上布里渊光纤激光器能够实现亚 Hz 量级的超窄线宽,但是如何测量亚 Hz 的线宽本身也是一个问题。由于布里渊激光的频率会由于泵浦光和环境原因产生慢漂,导致拍频信号频率产生漂移,因此难以测量得到亚 Hz 的超窄线宽<sup>[24]</sup>。

### 3.2 紧凑型 BEFL 的超低相位噪声特性

在某些领域,比如干涉型光纤传感系统中,激光器的相位噪声特性更受关注。激光器的线宽与相位噪声具有正相关的关系,BEFL 的超窄线宽表明其具有超低相位噪声,国防科技大学针对紧凑型 BEFL 的相位噪声进行了研究。

BEFL 的线宽压缩特性反映到相位噪声上就是布里渊泵浦光转换为 BEFL 激光后,相位噪声谱线得到显著地平滑,相位噪声大小得到明显地抑制,激光相干性得到大幅提升。采用 1 m 光程差的干涉仪对布里渊泵浦光及其产生的 BEFL 进行测量,结果如图 17 所示<sup>[51]</sup>。布里渊泵浦光的相位噪声谱在 800 Hz、1600 Hz 和 2400 Hz 处有三个明显凸起。与布里渊泵浦光相比,BEFL 的相位噪声谱比较平滑,相位噪声最大被抑制 20 dB。

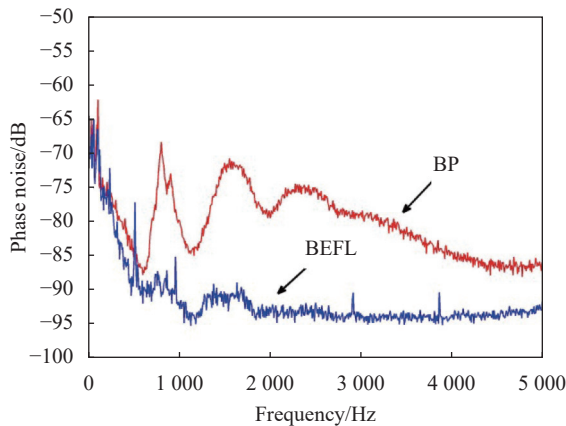


图 17 紧凑型 BEFL 及其 BP 的相位噪声谱<sup>[51]</sup>

Fig.17 Phase noise spectra of compact BEFL and BP<sup>[51]</sup>

将紧凑型 BEFL 与代表目前商用超窄线宽激光器最高水平之一的 RIO 外腔式激光器模块 (~3 kHz 线宽)<sup>[52]</sup> 进行比较。考虑到测试系统本身的背景噪声影响,使用 185 m 大光程差的干涉仪测量两台激光器

的相位噪声,以充分区分它们的相位噪声谱线。测试结果如图 18 所示<sup>[50]</sup>,BEFL 的相位噪声谱整体比超窄线宽 RIO 半导体激光器的噪声谱低。以 1 kHz 频点为例,BEFL 的相位噪声比 RIO 激光器低 23 dB。在 5 kHz 的高频处,BEFL 的相位噪声比 RIO 激光器低 30 dB。

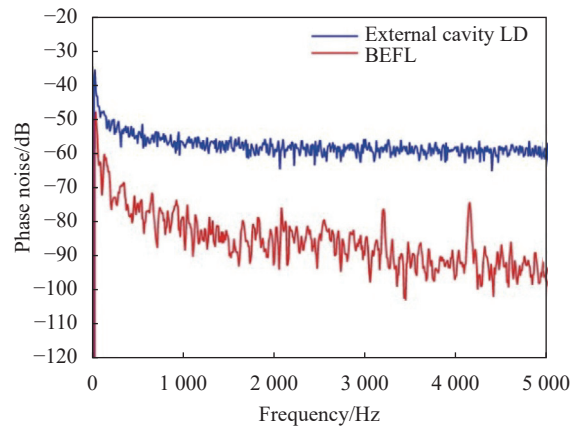


图 18 紧凑型 BEFL 和 RIO 激光器的相位噪声谱<sup>[50]</sup>

Fig.18 Phase noise spectra of compact BEFL and RIO laser diode<sup>[50]</sup>

使用 Optiphase 公司的 OPD-4000 光相位解调仪和 1 m 光程差的干涉仪,对 BEFL 的相位噪声进行测量。该光相位解调仪本身集成了低噪声光电探测器、A/D 采集卡以及基于 PGC 解调技术的信号解调处理软件,本底噪声极低 ( $\mu\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$ )<sup>[53]</sup>。得到 BEFL(增益光纤长度是 1.5 m)的相位噪声谱如图 19 所示<sup>[32]</sup>。在 1 kHz 频率处,该超窄线宽 BEFL 的相位噪声低至  $-125 \text{ dB}(\text{re } 1 \text{ rad}/\text{Hz}^{1/2})$ 。如此低的相位噪声使得紧凑

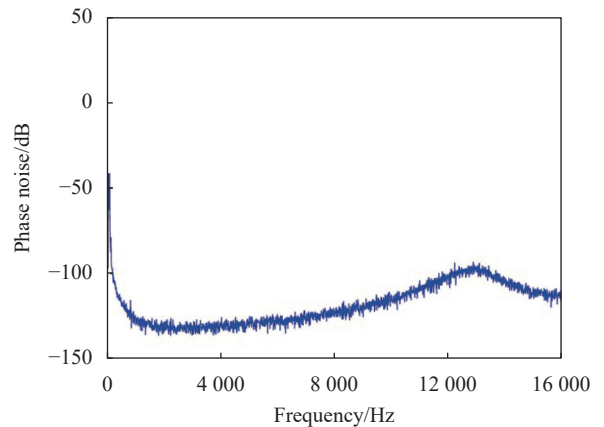


图 19 紧凑型 BEFL 的超低相位噪声<sup>[32]</sup>

Fig.19 Ultra-low phase noise of compact BEFL<sup>[32]</sup>

型 BEFL 在干涉型光纤传感等其他相干光学领域具有十分重要的应用价值。

### 3.3 紧凑型 BEFL 的低阈值特性

传统单频 BFL 存在布里渊泵浦阈值, 超过阈值后, BFL 功率随布里渊泵浦功率线性增加。传统 BEFL, 当布里渊泵浦超过阈值后, 其输出功率不随布里渊泵浦功率发生变化。对于紧凑型 BEFL, 布里渊泵浦功率对其输出功率特性的影响和 BFL 或者传统 BEFL 均不同。紧凑型 BEFL 对于布里渊泵浦光的要求非常低, 1 mW 或者几百  $\mu\text{W}$  的光功率即可保证 BEFL 稳定运转。增加布里渊泵浦光反而会导致 BEFL 输出功率的线性降低和 980 nm 泵浦阈值的增加, 如图 20 和图 21 所示<sup>[33]</sup>。

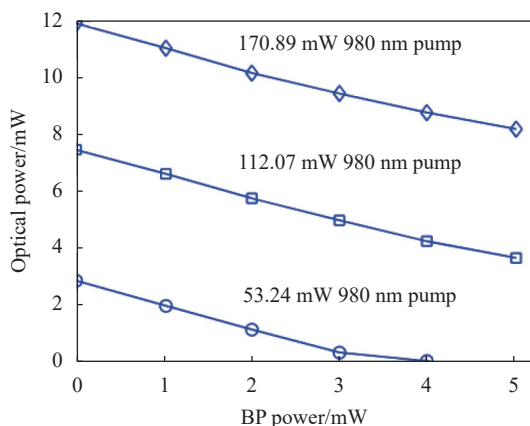


图 20 紧凑型 BEFL 的功率随 BP 功率变化曲线<sup>[33]</sup>

Fig.20 Optical power of compact BEFL versus BP power<sup>[33]</sup>

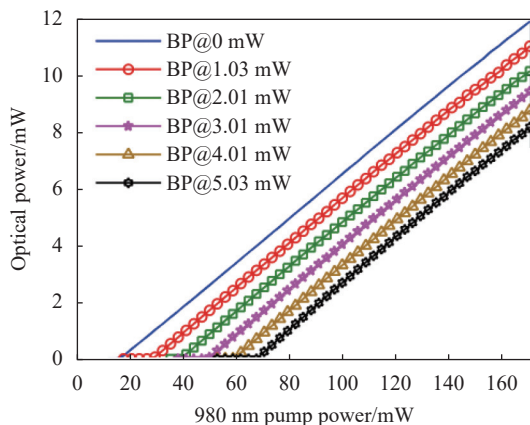


图 21 紧凑型 BEFL 功率随 980 nm 光功率变化曲线<sup>[33]</sup>

Fig.21 Optical power of compact BEFL versus 980 nm pump power<sup>[33]</sup>

紧凑型 BEFL 输出功率特性与布里渊泵浦功率之间的关系是由其本身结构与机理决定。布里渊泵

浦光入射到掺铒光纤上, 既作为泵浦光向布里渊 Stokes 光提供非线性增益, 同时作为信号光消耗掺铒光纤的线性增益。布里渊泵浦功率越大, 消耗的线性增益越多, 相应的布里渊 Stokes 光受到的线性增益减小, 因此紧凑型 BEFL 的输出功率随布里渊泵浦功率增加而线性降低。放大布里渊 Stokes 的线性增益减小也导致激光器需要更高的 980 nm 泵浦阈值以克服腔损。

虽然实验发现紧凑型 BEFL 对布里渊泵浦功率要求非常低, 即布里渊阈值很低, 但是一直没有理论模型对其进行解释。光纤的 SBS 阈值表达式如下<sup>[20]</sup>:

$$P_{th} = 21 \frac{A_{eff}}{g_B L_{eff}} \quad (5)$$

式中:  $A_{eff}$  为光纤的有效截面积;  $g_B$  为光纤的布里渊增益系数; 有效光纤长度  $L_{eff} = [1 - \exp(-\alpha L)] / \alpha$ ,  $\alpha$  是光纤损耗, 当光纤长度  $L$  较短时  $L_{eff} \approx L$ 。

掺铒光纤的有效截面积  $A_{eff}$  为  $19 \mu\text{m}^2$ , 布里渊增益系数  $g_B$  为  $5 \times 10^{-11} \text{ m/W}$ 。根据公式 (5), 在 4 m 的增益光纤上激发 SBS 需要 W 量级的布里渊泵浦光。实际上紧凑型 BEFL 仅需要 mW 量级的布里渊泵浦光。

2017 年, 国防科技大学研究团队建立理论模型并分析了线性增益对降低 SBS 阈值的作用<sup>[50]</sup>。仿真结果如图 22 所示, 相比未泵浦的掺铒光纤, 线性增益能有效降低 SBS 阈值, 且增益越大, 降低阈值的作用越大。特别是当掺铒光纤位于谐振腔内, 由于存在腔的反馈作用, SBS 阈值将更进一步得到大幅降低。假设

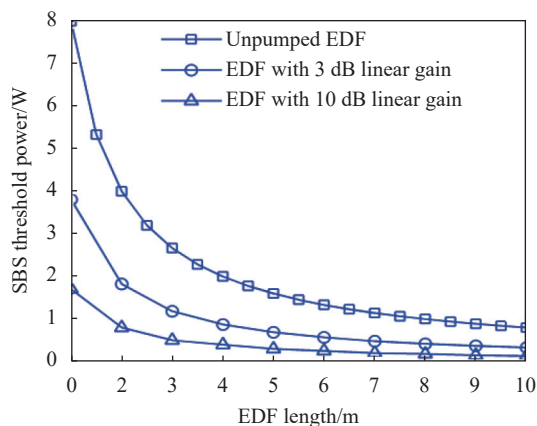


图 22 不同线性增益时 EDF 的 SBS 阈值随光纤长度变化曲线<sup>[50]</sup>

Fig.22 SBS threshold of EDF against fiber length at different linear gain<sup>[50]</sup>

谐振腔的功率反馈系数是  $R$ , SBS 阈值的解析表达式为:

$$P_{th} = \frac{\ln(RG)\ln G}{1-G} \frac{A_{eff}}{g_B L_{eff}} \quad (6)$$

公式 (6) 与公式 (5) 相似, 区别仅在于公式 (5) 的系数是常数 21, 而公式 (6) 的系数与腔反馈和掺铒光纤线性增益有关。根据前面计算线宽压缩的结果, 掺铒光纤为 4 m,  $R=0.5$ ,  $RG=0.988$ , 得到公式 (6) 的系数为 0.008, 紧凑型 BEFL 的布里渊泵浦阈值功率估算为 0.8 mW, 与实际情况基本符合。

综上可见掺铒光纤的线性增益对于紧凑型 BEFL 具有十分重要的作用, 一方面可以克服泵浦耦合谐振条件, 另一方面可以提高腔的精细度, 使得 BEFL 具有强烈的线宽压缩特性, 同时极大地降低了 SBS 阈值。

### 3.4 紧凑型 BEFL 的快速调谐特性

在基于相位产生载波 (PGC) 技术的干涉型光纤传感系统中, 光源除了需要具有低噪声、超窄线宽的特性, 还需要具有稳定的快速调谐性能。

光纤激光器通常通过压电陶瓷环 (PZT) 对腔长的调制实现激光器频率的调制。传统的 BFL 需要满足泵浦耦合谐振条件, 不能随意对腔长进行大幅的调制。传统的 BEFL 腔长过长, 很难实现高效的频率调制。紧凑型 BEFL 不受泵浦耦合谐振条件的限制, 且腔长很短, 可以利用 PZT 调制腔长实现高效的激光频率调制。

2014 年, 国防科技大学报道了低噪声的快速调谐 BEFL, 结构原理如图 23 所示<sup>[54-55]</sup>。采用 4 m 掺铒光纤作为布里渊增益与线性增益介质, 一部分掺铒光纤缠绕在 PZT 上, 通过对 PZT 施加正弦调制电压, 利用 PZT 的伸缩效应对激光器的频率进行调制。激光调制幅度与 PZT 调制电压之间的关系如图 24 所示。快速调谐 BEFL 最高可实现 60 MHz 的频率调谐范围, 调谐速率最高可达 48 kHz。快速调谐 BEFL 的相位噪声在 1 kHz 频率处为  $-124 \text{ dB}(\text{re } 1 \text{ rad}/\text{Hz}^{1/2})$ , 归一化至 1 m 光程差<sup>[55]</sup>。

值得说明的是, 光纤的布里渊频移与应力有关, PZT 调制腔长的同时会改变掺铒光纤的应力并影响掺铒光纤的布里渊频移大小<sup>[56]</sup>。但是同一个电压条件下, PZT 调制腔长导致的腔本征模式频率变化远大

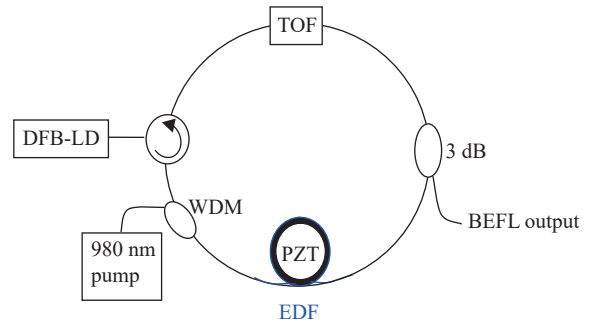


图 23 快速调谐 BEFL 结构示意图<sup>[54]</sup>

Fig.23 Configuration of fast tuning BEFL<sup>[54]</sup>

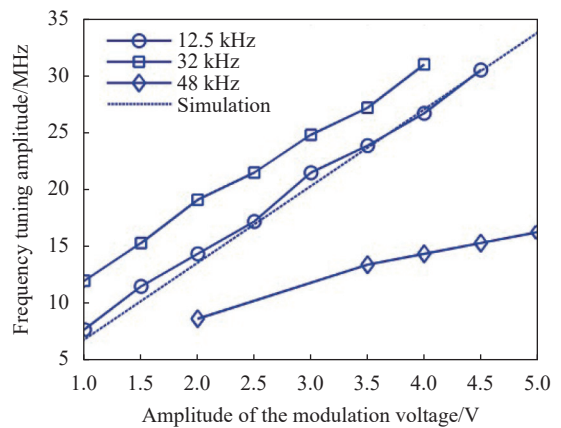


图 24 BEFL 快速调谐幅度与调制电压的关系<sup>[55]</sup>

Fig.24 Frequency modulating amplitude of the BEFL against the modulation voltage amplitude<sup>[55]</sup>

于应力变化导致的布里渊频移变化 (相差 3 个数量级), 因此可以认为布里渊增益谱位置不变, 如图 25 所示。PZT 的伸缩效应仅对腔的本征模式进行调制, BEFL 的频率调谐范围受限于布里渊增益谱宽。

快速调谐激光器的一个重要性能指标是快速调谐稳定性。半导体激光器的快速调谐基于工作电流的调制, 工作较不稳定。光纤激光器的快速调谐基于 PZT 对腔长的调制作用, PZT 的调制较为稳定, 因此使得激光器的快速调谐很稳定。测试超窄线宽半导体激光器和紧凑型 BEFL 在 45 min 内的快速调谐稳定性, 结果如图 26 所示。纵坐标  $C$  表示  $2\pi D\Delta f/c$ , 它反映频率调谐幅度  $\Delta f$  的变化趋势, 其中  $D$  是干涉仪的光程差,  $c$  是光速。BEFL 的  $C$  值保持平坦, 表明它具有稳定的快速调谐。半导体激光器的  $C$  值呈喇叭状发散, 快速调谐稳定性较差。因此相比半导体激光器, BEFL 具有稳定的快速调谐, 更有利于在干涉型光纤传感系统的应用。

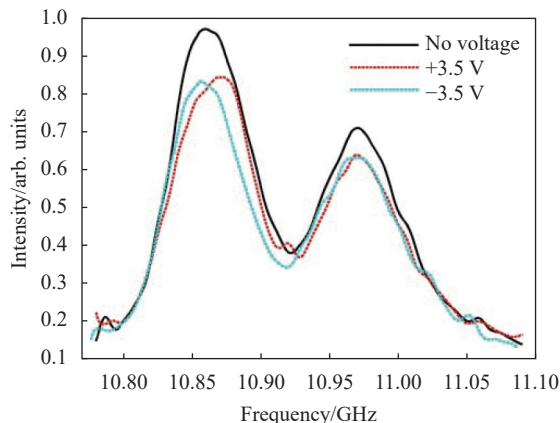


图 25 不同调制电压下 EDF 的布里渊增益谱<sup>[55]</sup>

Fig.25 Brillouin gain spectra of the EDF with different driving voltages<sup>[55]</sup>

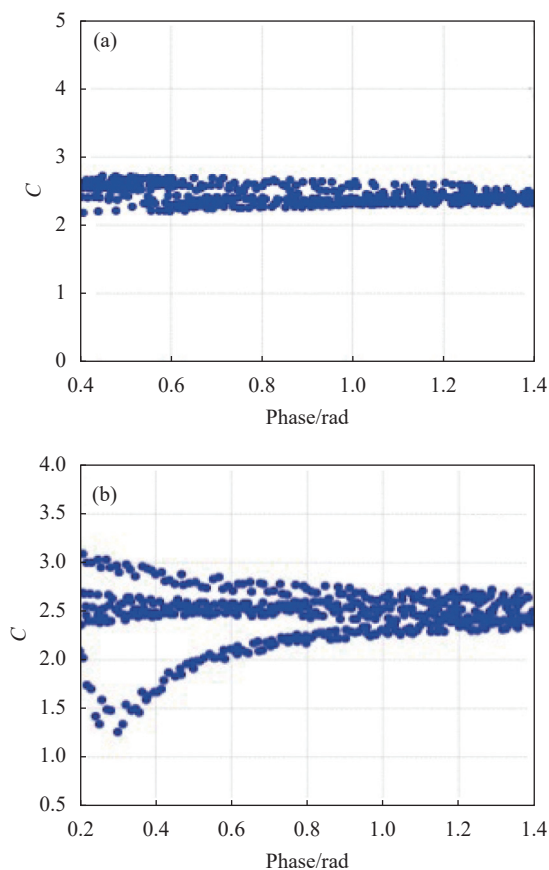


图 26 (a) 紧凑型 BEFL 和 (b) 超窄线宽 LD 的快速调谐稳定性

Fig.26 Fast-tuning stabilities of (a) compact BEFL and (b) narrow-linewidth LD

### 3.5 紧凑型 BEFL 的中心频率稳定性

BEFL 输出频率相比布里渊泵浦光频率下移一个布里渊频移, 频移大小由掺铈光纤本身性质决定, 同时与环境温度和光纤应力有关<sup>[56]</sup>。当掺铈光纤的温度、应力保持不变时, BEFL 的频率由布里渊泵浦光

频率决定。通常半导体激光器具有良好的中心频率稳定性, 它作为布里渊泵浦光, 产生的 BEFL 相比泵浦光具有稳定的布里渊频移, 因此 BEFL 也具有较好的中心频率稳定性。

2013 年, 国防科技大学对一台紧凑型 BEFL 的中心频率稳定性进行了研究<sup>[32]</sup>。在实验室环境下, 用扫描 F-P 干涉仪记录 BEFL 的中心频率相对变化量。2 h 内 BEFL 和布里渊泵浦光的频率漂移分别为 25 MHz 和 20 MHz。掺铈光纤激光器, 特别是基于饱和吸收体的掺铈光纤激光器受环境影响较大, 中心频率慢漂比较严重, 1 h 能漂移 250 MHz 左右。因此相比掺铈光纤激光器, BEFL 具有稳定的中心频率, 这是它在光纤传感系统中应用的优势之一。

### 3.6 紧凑型布里渊铈共掺光纤激光器

铈共掺光纤通过铈离子与镱离子之间的能量转换, 可以提供更有效的直接泵浦机制。相比掺铈光纤, 它具有更高的泵浦光子吸收效率和更高的增益系数。基于铈共掺光纤的紧凑型布里渊光纤激光器有望实现更高的输出功率。2023 年, 国防科技大学研究团队报道了基于 80 cm 铈共掺光纤作为布里渊增益和线性增益介质的布里渊铈共掺光纤激光器<sup>[57]</sup>。相比较 BEFL 毫瓦量级的输出功率, 该激光器的输出功率可达 200 mW。它的线宽为 140 Hz, 1 kHz 处的相位噪声为  $-107 \text{ dB re } 1 \text{ rad/Hz}^{1/2} (1 \text{ m 光程差})$ 。

## 4 应用与展望

经过理论与实验研究, 紧凑型 BEFL 克服了 BFL 苛刻的泵浦耦合谐振条件, 又保留了传统 BEFL 低阈值和较高输出功率的优势。不需要额外的激光稳频技术或专门的控温隔振条件, 紧凑型 BEFL 即可实现超窄线宽 ( $\sim 3 \text{ Hz}$ )、超低相位噪声 ( $-125 \text{ dB re } 1 \text{ rad/Hz}^{1/2} @ 1 \text{ kHz}, 1 \text{ m 光程差}$ ) 的高相干激光输出。其快速调谐稳定性优于目前的超窄线宽半导体激光器, 其稳定的中心频率优于基于饱和吸收体的超窄线宽掺铈光纤激光器。这些优异的激光特性使其在诸多相干光学领域具有十分广阔的应用前景。

### 4.1 干涉型光纤水听器系统中的初步应用

基于 PGC 技术的干涉型光纤传感系统对光源具有非常高的要求。理想的光源需要同时具有低相位噪声、稳定的快速调谐和稳定的中心频率这 3 个特

性。目前,国内干涉型光纤传感系统中普遍使用的光源主要为超窄线宽掺铒光纤激光器或者进口外腔式半导体激光器。这两种激光器均可达到~3 kHz 的超窄线宽,都能够满足系统对光源线宽的要求。但是掺铒光纤激光器存在中心频率慢漂的问题,不利于光纤水听器系统长期工作的稳定性;外腔式半导体激光器高频调制性能不稳定性限制了干涉型光纤传感系统探测信号带宽。

2018 年,国防科技大学报道了紧凑型 BEFL 在光纤水听器系统中应用的初步研究结果<sup>[58]</sup>。对一只光程差为 5 m 的光纤水听器探头的声压灵敏度频率响应曲线和系统本底相位噪声进行标定,实验系统如图 27 所示。分别使用紧凑型 BEFL 和外腔式半导体激光器作为水听器系统的光源,所测得的水听器探头声压灵敏度频响曲线如图 28(a) 所示,使用两种光源均可测得光纤水听器探头灵敏度为-145.5 dB。

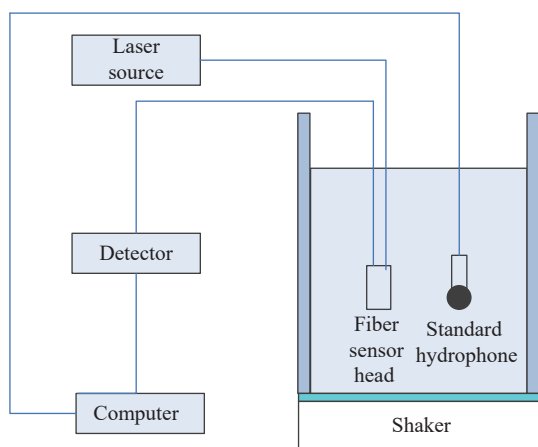


图 27 光纤水听器标定测试系统<sup>[58]</sup>

Fig.27 Experimental setup for calibrating fiber-optic hydrophone<sup>[58]</sup>

分别测试水听器系统的本底相位噪声,结果如图 28(b) 所示。从图中可见,使用 BEFL 作为光源的系统相位噪声整体上比使用 RIO 半导体激光器时的系统相位噪声水平更低。以 1 kHz 频点为例,使用 BEFL 的系统相位噪声(-98 dB)比使用 RIO 半导体激光器的系统相位噪声(-93 dB)低 5 dB。这表明,相比使用商用半导体激光器的水听器系统,使用超窄线宽 BEFL 作为光源可以进一步有效抑制水听器系统的本底噪声,提升水听器系统的探测性能。

BEFL 同时具有超窄线宽、快速调谐稳定和中心频率稳定的特点,是光纤水听器系统的理想光源。同

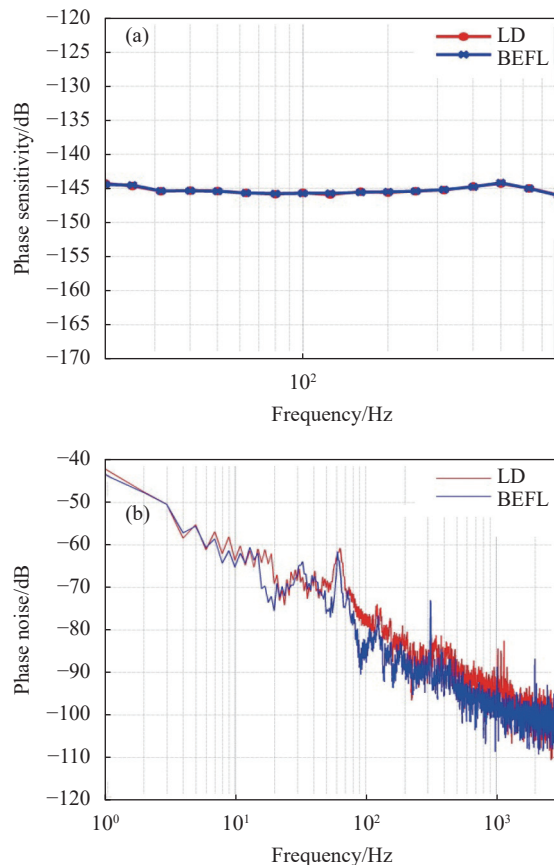


图 28 光纤水听器的 (a) 声压灵敏度和 (b) 系统本底相位噪声<sup>[58]</sup>

Fig.28 (a) Frequency response of acoustic pressure sensitivity and (b) phase noise spectra of the fiber-optic hydrophone<sup>[58]</sup>

时该光纤激光器具有完全自主知识产权,对于水听器系统的国产化十分有利。

#### 4.2 分布式布里渊光纤传感系统中的初步应用

BEFL 的输出光与其布里渊泵浦光相比下移了布里渊频移,且这个布里渊频移值取决于布里渊泵浦光波长和 BEFL 腔内所用的布里渊增益光纤。因此可将 BEFL 用在布里渊光纤传感系统中作为探测光。

紧凑型 BEFL 在布里渊光时域分析仪 (BOTDA) 中应用的系统原理图如图 29 所示<sup>[58]</sup>。半导体激光器的输出经耦合器分束,一束经声光调制器 (AOM) 后成为脉冲光,再经过扰偏器 (PS) 扰偏和掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大后作为 BOTDA 的脉冲泵浦光;另一束进入 BEFL 作为布里渊泵浦光产生布里渊激光,经 EDFA 放大之后作为 BOTDA 的连续探测光。待测光纤长度为 24.8 km,探测光和泵浦光在待测光纤中相向传输,探测光功率随时间的演化,经光电探测器

(D) 转换之后,经高速示波器进行数据采集,再进入电脑进行数据处理。得到的 BOTDA 时域信号波形如图 30 所示。初步的实验结果表明 BEFL 用作 BOTDA

探测光具有可行性,若要进一步实现分布式的温度应变传感,还需对泵浦光或探测光进行扫频。

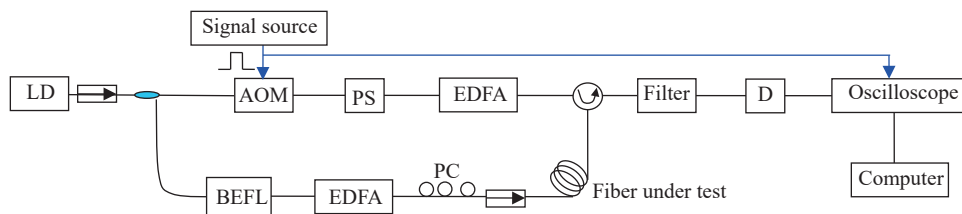


图 29 采用 BEFL 的 BOTDA 系统结构示意图<sup>[59]</sup>

Fig.29 Configuration of BOTDA based on BEFL<sup>[59]</sup>

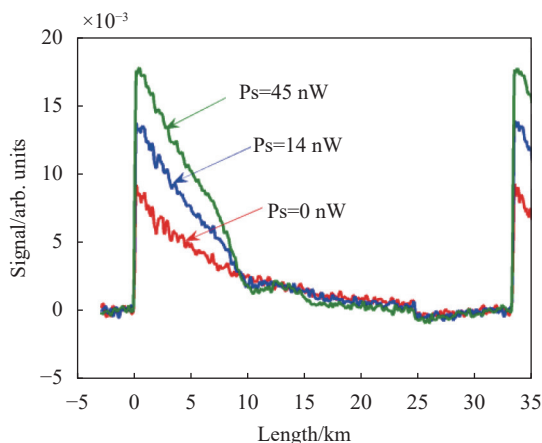


图 30 采用 BEFL 的 BOTDA 时域信号<sup>[59]</sup>

Fig.30 Time-domain signals of BOTDA using BEFL<sup>[59]</sup>

目前普遍采用微波电光移频技术产生具有一阶布里渊频移的光信号。电光强度调制器 (EOIM) 的电光转换效率不高,且高阶边带会引入噪声,同时 EOIM 需要进行复杂的工作点控制才能保证稳定工作在输出一阶边带强度最大的状态<sup>[60]</sup>。使用 BEFL 替代 EOIM 可以有效降低系统成本。其次,由于 BEFL 的布里渊泵浦光和布里渊传感系统的泵浦光来自于同一光源,两者具有稳定的光频差,可以避免光源频率不稳定导致的测量误差。另外,紧凑型 BEFL 的 Hz 量级超窄线宽,可以进一步提升系统分辨率。所以, BEFL 在分布式布里渊光纤传感系统中具有重要的应用价值。

### 4.3 展 望

超窄线宽布里渊光纤激光器经过几十年的发展,已经取得了长足的进步。特别的,基于普通掺铒光纤的紧凑型 BEFL 具有优异的超窄线宽特性,在诸多应

用领域具有潜在的重要的应用价值,有望进一步提升系统的性能。未来的发展方向,一是可以进一步提升其激光性能,比如发展窄线宽、高功率的布里渊光纤激光器;二是需要向模块化、工程化方向发展,以便真正实现大规模的应用。

## 5 结 论

基于光纤中 SBS 的布里渊光纤激光器具有优异的超窄线宽的特性,能够实现 Hz 量级的超窄线宽激光输出。布里渊光纤激光器的发展大致可分为 3 个阶段:最初的 BFL 到传统的 BEFL 再到紧凑型 BEFL。传统 BFL 腔长短 (10~20 m)、线宽超窄 (Hz 量级),但是通常需要苛刻的泵浦耦合谐振条件,因此较难实现。传统 BEFL 克服了泵浦耦合谐振条件,易于实现,且阈值低、功率较高。但是它需要长增益光纤,容易跳模。基于普通掺铒光纤的紧凑型 BEFL,不需要泵浦耦合谐振条件,同时具有腔长短、阈值低、功率较高、线宽超窄的特点。它克服了 BFL 和 BEFL 各自的缺点,集中了两者的优点,同时还具有稳定的中心频率和快速调谐特性,在光纤传感等诸多应用领域具有潜在的十分重要的应用前景。特别的,在基于 PGC 技术的干涉型光纤传感系统中,要求光源同时具备超窄线宽、快速调谐稳定、中心频率稳定的特性。现有的超窄线宽掺铒光纤激光器和超窄线宽半导体激光器均无法同时满足上述 3 个条件,不利于传感系统的长期工作稳定性。紧凑型 BEFL 的特性使其成为基于 PGC 技术的光纤传感系统的理想光源。经初步实验验证,相比超窄线宽外腔式半导体激光器,使

用紧凑型 BEFL 能够进一步降低传感系统的本底相位噪声,提高传感系统的性能。未来紧凑型 BEFL 将向模块化与工程化的方向发展,以广泛地应用到各种高相干光学领域,充分发挥其优异的超窄线宽特性。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Wanru, Su Rongtao, Li Can, et al. Research progress of narrow linewidth fiber laser oscillator (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(6): 20210879. (in Chinese)
- [2] Shi Wei, Fu Shijie, Sheng Quan, et al. Research progress on high-performance single-frequency fiber lasers: 2017-2021 (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20210905. (in Chinese)
- [3] Burrows E C, Liou K Y. High resolution laser LIDAR utilizing two-section distributed feedback semiconductor laser as a coherent source [J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(9): 577-579.
- [4] Wang J, Luo H, Meng Z, et al. Experimental research of an all-polarization-maintaining optical fiber vector hydrophone [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1178-1184.
- [5] Kane T J. Intensity noise in diode-pumped single-frequency Nd: YAG lasers and its control by electronic feedback [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1990, 2(4): 244-245.
- [6] Kotaki Y, Ogita S, Matsuda M, et al. Tunable, narrow-linewidth and high-power  $\lambda/4$ -shifted DFB laser [J]. *Electronics Letters*, 1989, 25(15): 990-992.
- [7] Bird D M, Armitage J R, Kashyap R, et al. Narrow line semiconductor laser using fibre grating [J]. *Electronics Letters*, 1991, 27(13): 1115-1116.
- [8] Numata K, Camp J, Krainak M A, et al. Performance of planar-waveguide external cavity laser for precision measurements [J]. *Optics Express*, 2010, 18(22): 22781-22788.
- [9] Chen C Y, Choy M M, Andrejco M J, et al. A widely tunable erbium-doped fiber laser pumped at 532 nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1990, 2(1): 18-20.
- [10] Sulaiman A, Harun S W, Arof H, et al. Compact and tunable erbium-doped fiber laser with microfiber Mach-Zehnder interferometer [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(9): 1165-1168.
- [11] Mo S, Huang X, Xu S, et al. 600-Hz linewidth short-linear cavity fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5818-5821.
- [12] Al-Taiy H, Wenzel N, Preubler S, et al. Ultra-narrow linewidth, stable and tunable laser source for optical communication systems and spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5826-5829.
- [13] Svelto C, Bava E, Taccheo S, et al. Pound-Drever frequency stabilized Yb-Er: glass laser against C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> molecules at 1.534 097  $\mu\text{m}$  [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(5): 461-462.
- [14] Horowitz M, Daisy R, Fischer B, et al. Narrow-linewidth, single-mode erbium-doped fiber laser with intracavity wave mixing in saturable absorber [J]. *Electronics Letters*, 1994, 3(8): 648-649.
- [15] Sejka M, Varming P, Hübner J, et al. Distributed feedback Er<sup>3+</sup>-doped fiber laser [J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(17): 1445-1446.
- [16] Stoehr H, Mensing F, Helmcke J, et al. Diode laser with 1 Hz linewidth [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(6): 736-738.
- [17] Aflatouni F, Bagheri M, Hashemi H. Design methodology and architectures to reduce the semiconductor laser phase noise using electrical feed-forward schemes [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2010, 58(11): 3290-3303.
- [18] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator [J]. *Applied Physics B*, 1983, 31: 97-105.
- [19] Grosche G, Terra O, Predehl K, et al. Optical frequency transfer via 146 km fiber link with 10<sup>-19</sup> relative accuracy [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(15): 2270-2272.
- [20] Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics: Chapter 9[M]//Stimulated Brillouin Scattering. New York: Elsevier, 2010.
- [21] Hill K O, Kawasaki B S, And Johnson D C. CW Brillouin laser [J]. *Applied Physics Letter*, 1976, 28(10): 608-609.
- [22] Wang G, Zhan L, Liu J, et al. Watt-level ultrahigh-optical signal-to-noise ratio single-longitudinal-mode tunable Brillouin fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(1): 19-21.
- [23] Smith S P, Zarinetchi F, Ezekiel S. Narrow-linewidth stimulated Brillouin fiber laser and applications [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(6): 393-395.
- [24] Boschhung J, Thevenaz L, Robert P A. High-accuracy measurement of the linewidth of a Brillouin fiber ring laser [J]. *Electronics Letters*, 1994, 30(18): 1488-1489.
- [25] Cowle G J, Stepanov D Y. Hybrid Brillouin/erbium fiber laser [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(16): 1250-1252.
- [26] Stepanov D Y, Cowle G J. Properties of Brillouin/erbium fiber lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1997, 3(4): 1049-1057.
- [27] Cowle G J, Stepanov D Y, Chieng Y T. Brillouin/erbium fiber lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(7): 1198-1204.

- [28] Stepanov D Y, Cowle G J. Modeling of multi-line Brillouin/erbium fiber lasers [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1999, 31: 481-494.
- [29] Lee J H, Tanemura T, Kikuchi K. Experimental comparison of a Kerr nonlinearity figure of merit including the stimulated Brillouin scattering threshold for state-of-the-art nonlinear optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(13): 1698-1670.
- [30] Abedin K S. Observation of strong stimulated Brillouin scattering in single-mode  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide fiber [J]. *Optics Express*, 2005, 13(25): 10266-10271.
- [31] Abedin K S. Single-frequency Brillouin lasing using single-mode  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide fiber [J]. *Optics Express*, 2006, 14(9): 4037-4042.
- [32] Chen M, Meng Z, Tu X, et al. Low-noise, single-frequency, single-polarization Brillouin/erbium fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(12): 2041-2043.
- [33] Chen M, Meng Z, Wang J, et al. Strong linewidth reduction by compact Brillouin/erbium fiber laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(5): 1502107.
- [34] Chen M, Meng Z, Zhang Y, et al. Ultranarrow-linewidth Brillouin/erbium fiber laser based on 45-cm erbium-doped fiber [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 1500606.
- [35] Chen M, Meng Z, Wang J, et al. Ultra-narrow linewidth measurement based on Voigt profile fitting [J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6803-6808.
- [36] Culverhouse D. Stimulated Brillouin scattering: Its generation and applications in optical fiber [D]. British: The British Library Document Supply Center, 1992.
- [37] Yao B, Tong Z, Yang X, et al. Tunable multiwavelength fiber laser based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 919-923. (in Chinese)
- [38] Yang Qian, Zhou Zezhong, Liu Kai, et al. Frequency interval switchable multi-wavelength Brillouin random fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(11): 1101003. (in Chinese)
- [39] Shee Y G, Al-mansoori M H, et al. Multiwavelength Brillouin-erbium fiber laser with double-Brillouin-frequency spacing [J]. *Optics Express*, 2011, 19(3): 1699-1706.
- [40] Debut A, Randoux S, Zemmouri J. Linewidth narrowing in Brillouin lasers: Theoretical analysis [J]. *Physical Review A*, 2000, 62(2): 023803.
- [41] Debut A, Randoux S, Zemmouri J. Experimental and theoretical study of linewidth narrowing in Brillouin fiber ring lasers [J]. *Journal of Optical Society of America B*, 2001, 18(4): 556-567.
- [42] Geng J, Staines S, Wang Z, et al. Highly stable low-noise Brillouin fiber laser with ultranarrow spectral linewidth [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(17): 1813-1815.
- [43] Geng J, Jiang S. Pump-to-Stokes transfer of relative intensity noise in Brillouin fiber ring lasers [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(1): 11-13.
- [44] Chen Wei, Zhang Yan, Ren Min, et al. Experimental study of single-longitudinal-mode Brillouin erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(9): 1740-1746. (in Chinese)
- [45] Shahi S, Harun S W. Brillouin fiber laser with significantly reduced gain medium length operating in L-band region [J]. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2009, 8: 143-149.
- [46] Harun S W, Shahi S, Ahmad H. Compact Brillouin-erbium fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(1): 46-48.
- [47] Harun S W, Parvizi R, Shahi S, et al. Compact Bi-EDF-based Brillouin erbium fiber laser operating at the 1560-nm region [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2009, 1(5): 254-258.
- [48] Zhou H, Xun C, Chen M, et al. Characteristics of a Brillouin-erbium fiber laser based on Brillouin pump preamplification [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(29): 7046-7051.
- [49] Zhou Huijuan, Chen Mo, Chen Wei, et al. Brillouin-erbium fiber laser with ultra-short ring cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(7): 0702010. (in Chinese)
- [50] Chen M, Wang C, Wang J, et al. 53-dB phase noise suppression and Hz-range linewidth emission in compact Brillouin/erbium fiber laser [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19216-19225.
- [51] Chen M, Wang J, Chen W, et al. High-coherence light extraction through a compact Brillouin/erbium fiber laser [C]//Proc of SPIE, 2016, 9916: 99162H.
- [52] Alalusi M, Brasil P, Lee S, et al. Low noise planar external cavity laser for interferometric fiber optic sensors [C]//Proc of SPIE, 2009, 7316: 73160X.
- [53] Zhou H, Chen W, Meng Z, et al. Phase noise characteristics of narrow-linewidth fiber laser and laser diode in unbalanced interferometers [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(2): 021401.
- [54] Chen M, Meng Z, Tu X, et al. Fast-tuning, low-noise, compact Brillouin/erbium fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 689-692.
- [55] Chen M, Meng Z, Sun Q, et al. Mechanism and characteristics of a fast-tuning Brillouin/erbium fiber laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 15039-15048.



- [56] Zhou H, Liao Y, Meng Z. Distributed optical fiber sensing based on Brillouin scattering [J]. *Optical Technique*, 2008, 34: 251-256. (in Chinese)
- [57] Chen M, Meng Z, Liu H, et al. 140-Hz narrow-linewidth Brillouin/erbium-ytterbium fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2023, 35(10): 521-524.
- [58] Chen M, Wang J, Lu Y, et al. Brillouin/Erbium fiber laser and applications in interferometric fiber sensors [C]/26th International Conference on Optical Fiber Sensors, Swiss, 2018: TuE46.
- [59] Zhou Huijuan. Distributed fiber sensing system based on stimulated Brillouin scattering and its applications [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [60] Liao Y, Zhou H, Meng Z. Modulation efficiency of a LiNbO<sub>3</sub> waveguide electro-optic intensity modulator operating at high microwave frequency [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(12): 1822-1824.

## Research progress of ultra-narrow-linewidth Brillouin fiber laser (*invited*)

Chen Mo, Wang Jianfei, Lu Yang, Hu Xiaoyang, Chen Wei, Meng Zhou\*

(College of Meteorology and Oceanology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

### Abstract:

**Significance** Ultra-narrow-linewidth (~ kHz) lasers have attracted much research interest because of their wide applications in optical communications, fiber sensors, and so on. The linewidth of lasers affects the performance of the systems, such as the communication length, the minimum detection signal, and the measurement accuracy. Brillouin fiber lasers (BFLs), based on stimulated Brillouin scattering (SBS) in fibers, present Hz-scale ultra-narrow linewidth due to their intrinsic linewidth-narrowing effect. With its development in the past several decades, the compact Brillouin/erbium fiber laser (BEFL) becomes the frontier of the research on BFLs. Unlike the erbium-doped fiber lasers or laser diodes, the compact BEFL presents Hz-scale linewidth without complicated feedback loop or extremely precise isolation from the temperature and vibration variations. Besides the advantage of ultra-narrow linewidth, the BEFL simultaneously presents very stable central frequency and stable fast tuning. These outstanding performances make the compact BEFL a very ideal laser source for many applications, especially for phase-generation-carrier (PGC) interferometric fiber sensors.

**Progress** The development of narrow-linewidth BFLs went through three stages, i.e. the early-days BFLs, the traditional BEFLs, and the compact BEFLs. The BFLs were introduced according to the three development stages. In the early days, the BFL was based on SBS in a single-mode fiber resonator (Fig.1-4). The Brillouin pump (BP) was injected in the cavity and generates SBS in the single-mode fibers. The BFL needed high pump threshold or critical pump coupled resonator due to the small Brillouin coefficient. The Brillouin/erbium fiber laser (BEFL) was then proposed to overcome the need of a pump couple resonator by introducing an erbium-doped fiber amplifier in the resonator (Fig.5). The BEFL presents low threshold and high output power (Fig.6(b)), but it needed over 100-m single-mode fibers as the Brillouin gain medium. Long cavity causes mode hopping easily. Many studies were carried out to establish single-longitudinal BEFL, such as multi-resonance-cavity BEFL (Fig.7), short-cavity BEFL based on high-nonlinearity special fibers (Fig.8), single-mode BEFL based on Brillouin pump preamplification (Fig.9). Short-cavity, low-threshold BEFLs were desirable. Until 2012, the compact BEFL was proposed based on a length of erbium-doped fiber (EDF) providing both the Brillouin gain and linear gain (Fig.10). It presented short cavity and low threshold. In 2013, an all-polarization-maintained ultra-

short-ring-cavity compact BEFL was reported (Fig.11). The mechanism, characteristics, and applications of the compact BEFL were studied in the following 10 years. A series of progress has been achieved on the studies of compact BEFL. This kind of fiber laser showed 3-Hz ultra-narrow linewidth (Fig.16), stable central frequency, and stable fast tuning (Fig.26). The phase noise of the BEFL is lower than the state-of-the-art commercial laser diodes (Fig.18). The outstanding performance of the compact BEFL leads to many important potential applications, such as in high-accuracy interferometric fiber sensors (Fig.27-28) and Brillouin distributed fiber sensors (Fig.29-30).

**Conclusions and Prospects** The optical communication and sensing systems are in great need of high-performance ultra-narrow-linewidth lasers. The BFLs, based on SBS in fibers, present Hz-scale ultra-narrow linewidth. The BFLs have already been developed to the stage of the compact BEFLs, which present ultra-narrow linewidth, stable central frequency, and stable fast tuning simultaneously. Compared with the state-of-the-art narrow-linewidth external-cavity laser diodes, the compact BEFL presents even lower phase noise. The applications in interferometric fiber sensors and distributed fiber sensors are validated for the compact BEFL. The advantages of the applications of the compact BEFLs are verified. The compact BEFL has a fully independent intellectual property, it has great significance for the localization of producing many important optoelectric information systems. The research aims to provide some reference for the study and applications of narrow-linewidth lasers in the future. It is expected that the compact BEFL will be modularized so that it could be widely used in more applications.

**Key words:** fiber laser; ultra-narrow linewidth; single frequency; erbium-doped fiber; stimulated Brillouin scattering

**Funding projects:** National Key Research and Development Program of China (2022YFB3205302); National Natural Science Foundation of China (61705263)