

# 超短环形腔布里渊掺铒光纤激光器

周会娟 陈 默 陈 伟 孟 洲

(国防科技大学 光电科学技术与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 提出了一种超短环形腔布里渊掺铒光纤激光器(BEFL),腔长仅为 10 m。该 BEFL 以 4 m 长的普通掺铒光纤(EDF)为激光增益介质,腔外布里渊抽运光和 980 nm 抽运光的注入在掺铒光纤中,分别引入非线性布里渊增益和线性掺铒光纤放大器(EDFA)增益。实验结果表明,BEFL 工作在单纵模状态,输出信噪比高(>40 dB),抽运阈值低(~20 mW),输出功率大(>10 mW),且布里渊抽运光不仅决定 BEFL 的输出波长,更对其抽运阈值和出光功率有重要影响。

**关键词** 激光器;布里渊掺铒光纤激光器;单纵模;超短环形腔

**中图分类号** TN248; O437.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0702010

## Brillouin-Erbium Fiber Laser with Ultra-Short Ring Cavity

Zhou Huijuan Chen Mo Chen Wei Meng Zhou

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** An ultra-short ring-cavity Brillouin-erbium fiber laser (BEFL), whose cavity length is only 10 m, is demonstrated. The BEFL adopts a section of normal erbium-doped fiber (EDF) with a length of 4 m as the gain medium. Nonlinear Brillouin gain and linear erbium-doped fiber amplifier (EDFA) gain are both introduced into the EDF by using the Brillouin pump and the 980 nm pump outside the cavity, respectively. Experimental results demonstrate that the BEFL operates at single-longitudinal mode with a high signal-to-noise ratio (>40 dB), a low pump threshold (~20 mW), and a high output power (>10 mW). Moreover, the Brillouin pump not only decides the output wavelength of the BEFL, but also greatly affects its pump threshold and output power.

**Key words** lasers; Brillouin-erbium fiber laser; single-longitudinal mode; ultra-short ring cavity

**OCIS codes** 140.3500; 140.3510; 140.3570; 290.5900

## 1 引 言

受激布里渊散射(SBS)是一种能在光纤内发生的非线性过程,一旦达到布里渊阈值,SBS 将把绝大部分抽运功率转移到后向 Stokes 波中<sup>[1]</sup>。基于 SBS 在光纤中的增益作用,可将其用于构建布里渊光纤放大器<sup>[2]</sup>、布里渊光纤激光器<sup>[3]</sup>、布里渊分布式光纤传感器<sup>[4]</sup>等。特别地,布里渊光纤激光器因其窄线宽自 1976 年问世以来就一直是一个活跃的研究课题<sup>[5]</sup>。但是布里渊增益较小且偏振敏感,布里

渊光纤激光器需要苛刻的谐振腔及抽运光波长与腔长的匹配<sup>[3]</sup>。1996 年,Cowle 等<sup>[6]</sup>通过在布里渊光纤激光器腔内引入掺铒光纤放大器(EDFA)补偿腔损发展了布里渊掺铒光纤激光器(BEFL)。BEFL 不仅克服了布里渊光纤激光器的缺点,而且具有窄线宽(~kHz)和高输出功率(~mW)的优点<sup>[7,8]</sup>。由于可以方便地级联 SBS,使得低阶 Stokes 光作为种子光抽运高阶 Stokes 光,多波长 BEFL 在构建激光频率梳方面取得了巨大的成功,在密集波分复用

收稿日期:2012-03-22;收到修改稿日期:2012-05-03

基金项目:国家自然科学基金(61177073)和高等学校博士学科点专项科研基金(20104307110020)资助课题。

作者简介:周会娟(1985—),女,博士研究生,主要从事基于布里渊散射的分布式光纤传感技术的研究。

E-mail: songlzhou@163.com

导师简介:孟 洲(1968—),女,教授,博士生导师,主要从事光纤器件、光纤传感以及光纤激光器的研究。

E-mail: zhousong6806@163.com(通信联系人)

甚至超密集波分复用方面有广阔的应用前景<sup>[9~11]</sup>。另一方面,作为一种高相干光源,单波长 BEFL 也有许多潜在应用,如干涉型光纤传感、分布式光纤传感、相干光通信等。

单模光纤的布里渊增益系数较小( $\sim 10^{-11}$  m/W),为了获得较高的布里渊增益,需要足够长的布里渊增益介质,目前报道的构成 BEFL 的单模光纤最短为 100 m<sup>[6]</sup>,对应模式间隔约 2 MHz,考虑到单模光纤中布里渊增益谱宽约为 20 MHz,布里渊增益谱内存在约 10 个模式,强烈的模式竞争使得 BEFL 难以工作在稳定的单纵模状态。2008 年陈伟等<sup>[12]</sup>报道了一种单纵模布里渊掺铒光纤激光输出,该激光器所用单模光纤长度约为 500 m,通过可调谐滤波器滤波、窄带宽的布里渊增益选模以及多环形腔增加谐振腔模式间隔,还需要调节布里渊抽运波长与腔长匹配来实现单纵模激光输出,该激光器结构复杂。

实现单纵模激光运转最可能的方法莫过于缩短腔长,增大模式间隔,使得布里渊增益谱内只存在一个模式。一种缩短 BEFL 腔长进而增加模式间隔的方法是采用具有高布里渊增益系数的特种光纤作为布里渊增益介质,如掺铋掺铒光纤<sup>[13]</sup>和光子晶体光纤(PCF)<sup>[14]</sup>等。但是,这些特种光纤价格昂贵,与单模光纤之间熔接损耗大,导致激光抽运阈值较高(超过 100 mW 的 1480 nm 抽运功率),或者需要足够长的增益介质,如池灏等<sup>[15]</sup>报道的采用 20 m PCF。

本文利用普通掺铒光纤(EDF)既可以做布里渊增益介质又可以提供线性的 EDFA 增益,实现了腔长小于 10 m 的超短环形腔 BEFL 单纵模输出,其中所用铒纤长度仅为 4 m。该激光器可工作在 C 波段任意波长,且 980 nm 抽运阈值低,输出功率大。

## 2 实验系统

单波长布里渊掺铒光纤激光器一般采用环形腔结构,可以较好地抑制高阶 Stokes 光。超短环形腔布里渊掺铒光纤激光器结构如图 1 所示。布里渊抽运光(BP)经由一个 3 dB 耦合器注入激光谐振腔内,在 EDF 中激起后向散射光,该散射光沿顺时针方向在谐振腔中振荡。其中低频的布里渊 Stokes 分量不断地经历非线性的布里渊增益和线性的 EDFA 增益,最终经历的增益大于损耗而形成布里渊激光,即 BEFL(图 1 中红色实线箭头所示,彩图见网络电子版),其一部分经由 3 dB 耦合器输出,另

一部分继续在腔内振荡。后向散射光中的 Rayleigh 成分虽会被 EDFA 放大,但是也经历了环形腔的损耗,增益与损耗相当,另外 BEFL 的形成,也占据了大部分的 EDFA 增益,最终的结果是 Rayleigh 成分基本保持不变;后向散射光中的高频布里渊 Anti-Stokes 成分相比 Rayleigh 散射光,还经历了额外的布里渊损耗,将被完全抑制。由于环形器的阻挡,BP(图 1 中蓝色虚线箭头所示)不能够在环形腔中振荡,避免了高阶 Stokes 光的产生。

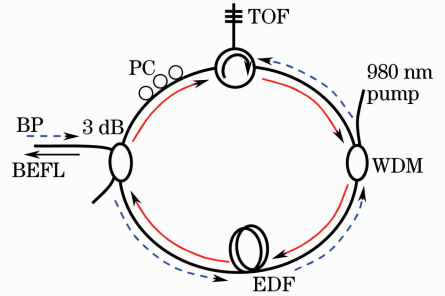


图 1 超短环形腔布里渊掺铒光纤激光器的结构示意图  
Fig. 1 Configuration of the proposed Brillouin-erbium fiber laser

当没有外加的 BP 时,该谐振腔即为一个基本的掺铒光纤激光器(EDFL)。由于 EDF 的增益谱较宽(1520 nm~1560 nm,约为 40 nm),环形腔的纵模间隔较小,需要引入复杂的线宽压缩技术实现稳定的单纵模运转,如在环形腔中引入未抽运的掺铒光纤作为饱和吸收体形成自适应的窄线宽光栅<sup>[16]</sup>等。BEFL 则是通过外加的 BP,在 EDFA 腔内引入了窄线宽的布里渊增益(单模光纤 1550 nm 抽运时谱宽约为 20 MHz),通过缩短谐振腔长,增大模式间隔,使得布里渊增益谱内只存在一个激光模式,最终形成单纵模的 BEFL 输出。此外,只要激光器的线宽小于 EDF 的布里渊增益谱宽,就可以用作 BEFL 的布里渊抽运光,如兆赫兹量级的分布反馈式半导体激光器(DFB-LD)等。系统中所用 EDF (Coractive™)长度约为 4 m,1530 nm 处的峰值吸收系数为(18±2)dB/m,截止波长为(900±50)nm,通过一个(1550/980)nm 的波分复用器(WDM)经由一个 980 nm 半导体激光器抽运。腔内引入了一个线宽约为 0.35 nm 的可调谐滤波器(TOF),用来抑制腔内的放大自发辐射(ASE)噪声,也即控制腔内的 EDFA 模式,则谐振腔振荡模式将被限制在滤波器带宽之内,相比 40 nm 的 EDFA 增益谱宽,无论滤波器的中心波长设置在哪个波长,滤波器带宽之内的 EDFA 增益谱都可认为是平坦的,且带宽内的

激光模式经历的 EDFA 增益相等,只有当 BP 波长和滤波器中心波长匹配时,即对应的 Stokes 光频位于滤波器带宽之内时,BEFL 模式才能经历额外的布里渊增益而首先克服腔损,形成激光;TOF 的引入同时也解除了 BEFL 对 BP 波长的要求<sup>[7]</sup>。利用偏振控制器(PC)调节腔内的偏振态匹配。构成谐振腔各器件之间的连接线长度控制在 6 m 以内,这样总的谐振腔长约为 10 m,模式间隔接近 EDF 的布里渊增益谱宽,形成单纵模激光输出。

### 3 结果与讨论

采用一个线宽约 20 kHz 的 RIO<sup>TM</sup> 外腔式半导体激光器作为 BP,其输出波长为 1550.43 nm。固定 BP 的功率为 5.7 mW,当 980 nm 抽运光功率分别为 18、21、33、76 mW 时,使用光谱仪(ADVANTEST<sup>TM</sup>,分辨率为 0.01 nm)实测 BEFL 的输出光谱如图 2 所示。由图可知,输出光谱中包含与 BP 同频的 Rayleigh 成分和与 BP 严格相差布里渊频移( $\sim 0.089$  nm)的低频 Stokes 成分。随着 980 nm 抽运光功率的增加, Rayleigh 光基本保持不变, Stokes 光经历了从无到有逐渐增加的过程,表明该环形腔形成了布里渊激光,也即 BEFL。在 980 nm 抽运光功率为 76 mW 时, BEFL 的光学信噪比超过了 40 dB,随 980 nm 抽运功率的增加,信噪比还可提高。只要 BP 工作波长在 C 波段也即在 EDFA 增益谱之内,精细调节腔内 TOF 中心波长与之匹配,该 BEFL 可工作于 C 波段任意波长。

由于光谱仪的分辨率有限,输出光谱不能精细地反映激光器的模式结构,因此,使用扫描 F-P 干涉仪(自由光谱范围  $R_{fs} \approx 1.5$  GHz,精细度为 200)

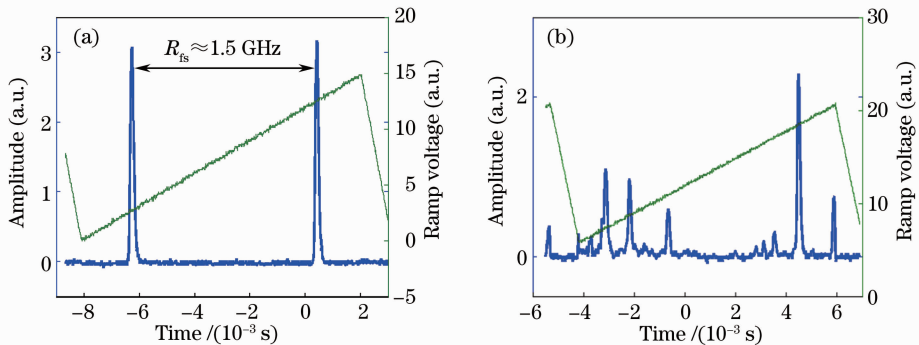


图 3 谐振腔辐射的激光模式结构。(a) BEFL;(b) EDFL

Fig. 3 Laser mode structure of the resonator. (a) BEFL; (b) EDFL

由图 2 可知, BEFL 存在抽运阈值。固定 BP 光功率分别为 0、4、1、5.7 mW 时,实测该激光谐振腔输出光功率随 980 nm 抽运光功率的变化如图 4 所

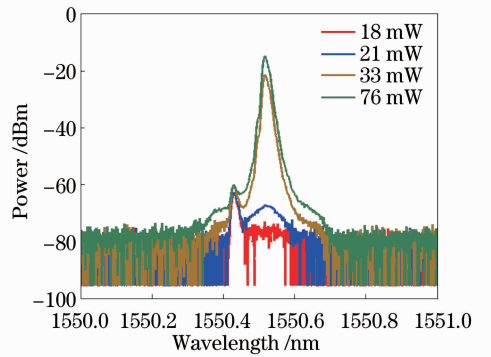


图 2 BEFL 的输出光谱随 980 nm 抽运光功率的变化

Fig. 2 Optical spectra of the BEFL versus pump powers at 980 nm

来测量该谐振腔辐射的激光模式,如图 3 所示。扫描 F-P 干涉仪的分辨率约为 7.5 MHz,该谐振腔的模式间隔约为 20 MHz,图 3(a)表示当 BP 开启时 BEFL 的模式结构,充分说明了 BEFL 工作在单纵模状态。作为对比,图 3(b)给出了当 BP 关闭时 EDFL 的典型模式结构,表现出不稳定的多模运转。这是由于腔内使用的 TOF 带宽约为 0.35 nm,滤波器带宽内存在数百个 EDFL 模式,强烈的模式竞争使得该 EDFL 难以工作在单纵模状态。需要指出的是,TOF 的中心波长必须与 BP 引入的 Stokes 波长一致,才能有效抑制腔内的 EDFL 模式,保证谐振腔输出单纵模的 BEFL。实验中搭建的 BEFL 系统只是进行了简单的封装并放置于实验台上隔离外界机械振动干扰,尽管布里渊增益对外界环境尤其是温度变化敏感<sup>[4]</sup>,在室温且没有进行温度控制的实验室环境中, BEFL 的单纵模运转能长时间保持,这是由混合增益(布里渊增益和 EDFA 增益)的均匀展宽特性所决定的。

示。需要指出的是,当 BP 功率为 0 时,也即关闭 BP,谐振腔工作在多纵模 EDFL 模式。由图可知, EDFL 存在一个抽运阈值约为 7 mW,之后随着

980 nm抽运光功率的增加,EDFL 的输出光功率线性增加,这正是谐振腔内线性 EDFA 增益起作用的表现<sup>[16]</sup>。当开启 BP 时,该谐振腔工作在单纵模 BEFL 模式,也存在一个抽运阈值,当 BP 功率分别为 4.1 mW 和 5.7 mW 时,对应的抽运阈值分别为 18 mW 和 24 mW。在抽运阈值之上,BEFL 输出功率随 980 nm 抽运光功率线性增加,且抽运效率与 EDFL 相同,约为 15%,并且在 980 nm 抽运光功率为 100 mW 时,BEFL 的输出功率已远大于 10 mW。

值得注意的是,随 BP 光功率的增加(0 → 4.1 mW → 5.7 mW),该谐振腔的抽运阈值随之增大,输出光功率则随之减小,这与文献[6~8,15]中 BP 功率的增加几乎不影响 BEFL 的抽运阈值和输出光功率不同。这是由于 BP 的注入,在 EDF 中引入后向散射光的同时,也消耗了 EDFA 增益粒子用于 BP 功率的放大。同样的 980 nm 抽运光功率下,随着注入的 BP 光功率的增加,消耗的 EDFA 增益粒子数随之增加,用于 Stokes 光放大的 EDFA 增益则随之减小,相应的谐振腔的抽运阈值将被抬高,伴随着输出光功率的减小。因此,BP 波长决定了 BEFL 的输出光频率,BP 功率对 BEFL 的输出光功率也有较大的贡献。为了获得更大的 BEFL 输出,需要大的 980 nm 抽运光功率和小的 BP 功率,但是 BP 功率也不能太小,以避免布里渊增益太弱使得 BEFL 模式竞争不过 EDFL 模式而不能获得单纵模的 BEFL 输出。

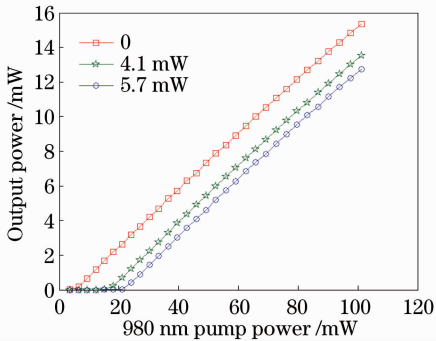


图 4 激光谐振腔的输出光功率随 980 nm 抽运光功率的变化

Fig. 4 Output power of the resonator versus the 980 nm pump power

## 4 结 论

利用 4 m 长的普通掺铒光纤既可以做布里渊增益介质又可以提供线性的 EDFA 增益补偿腔损,实现了腔长仅为 10 m 的单纵模 BEFL 输出。实验

结果表明,该 BEFL 输出信噪比高(>40 dB),抽运阈值低(~20 mW),输出光功率大(>10 mW),可工作于 C 波段任意波长;布里渊抽运光不仅决定着 BEFL 的输出频率,也影响着 BEFL 的输出功率。该单纵模 BEFL 在一些需要高相干光源的应用场合,如干涉型光纤传感等领域有重要的应用前景。此外,由于该 BEFL 输出频率与其布里渊抽运光频率之间具有天然的布里渊频移,可以考虑将其应用于基于布里渊散射的分布式光纤传感,降低系统成本,提高检测精度。

## 参 考 文 献

- 1 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics[M]. 4th Edition, Calif: Academic Press, 2007. 331~360
- 2 R. W. Tkach, A. R. Chraplyvy, R. M. Derosier. Performance of a WDM network based on stimulated Brillouin scattering[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1989, **1**(5): 111~113
- 3 S. P. Smith, F. Zarinetchi, S. Ezekiel. Narrow-linewidth stimulated Brillouin fiber laser and applications[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(6): 393~395
- 4 Xiaoyi Bao, Liang Chen. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors[J]. *Sensors*, 2011, **11**(4): 4152~4187
- 5 K. O. Hill, B. S. Kawasaki, D. C. Johnson. CW generation of multiple Stokes and anti-Stokes Brillouin-shifted frequencies[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1976, **29**(3): 185~187
- 6 G. J. Cowle, D. Yu. Stepanov. Hybrid Brillouin/erbium fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(16): 1250~1252
- 7 G. J. Cowle, D. Yu. Stepanov, Y. T. Chieng. Brillouin/erbium fiber laser[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(7): 1198~1204
- 8 G. J. Cowle, D. Yu. Stepanov. Properties of Brillouin/erbium fiber lasers[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, 1997, **3**(4): 1049~1057
- 9 Hu Song, Wei Shikang, Zhan Li *et al.*. 15-wavelength Brillouin erbium-doped fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 212~215  
胡松,尉仕康,詹黎等. 15 波长输出的布里渊掺铒光纤激光器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 212~215
- 10 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
- 11 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
- 12 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): 1740~1744  
陈伟,张艳,任民等. 单纵模布里渊掺铒光纤激光器的实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1740~1744
- 13 S. W. Harun, S. Shahi, H. Ahmad. Compact Brillouin-erbium fiber laser[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(1): 46~48
- 14 S. Shahi, S. W. Harun. Brillouin fiber laser with significantly reduced gain medium length operating in L-band region [J]. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2009, **8**: 143~149
- 15 Chi Hao, Zhang Xianmin, Shen Linfang. Brillouin fiber laser based on photonics crystal fiber[J]. *J. Zhejiang University*

(*Engineering Science*), 2006, **40**(12): 2126~2129

池 灏, 章献民, 沈林放. 基于光子晶体光纤的布里渊光纤激光器[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2006, **40**(12): 2126~2129

16 Zhou Meng, George Stewart, Gillian Whitenet. Stable single-

mode operation of a narrow-linewidth, linearly polarized, erbium-fiber ring laser using a saturable absorber [J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(5): 2179~2183

栏目编辑: 宋梅梅