

## 窄线宽光纤激光振荡器研究进展 (特邀)

张万儒, 粟荣涛\*, 李 灿\*, 张 嵩, 姜 曼, 马鹏飞, 马阎星, 吴 坚, 周 朴

(国防科技大学 前沿交叉学科学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 窄线宽光纤激光器在遥感探测、非线性频率转换和光束合成等领域具有重要的应用价值。介绍了窄线宽光纤激光振荡器的典型谐振腔结构及其工作原理, 从实现更窄线宽的角度梳理了单频选模技术, 从获得更高功率的角度梳理了功率提升技术, 综述了窄线宽光纤激光振荡器的研究现状, 并对窄线宽光纤激光技术的发展进行了展望。

**关键词:** 光纤激光; 窄线宽; 单频; 高功率

**中图分类号:** TN248      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20210879

## Research progress of narrow linewidth fiber laser oscillator (*Invited*)

Zhang Wanru, Su Rongtao\*, Li Can\*, Zhang Song, Jiang Man, Ma Pengfei, Ma Yanxing, Wu Jian, Zhou Pu

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Narrow linewidth fiber lasers can be used in applications such as remote sensing, nonlinear frequency conversion and beam combination. In this paper, the typical structures and corresponding working principles of narrow linewidth fiber laser oscillator were introduced. The single-frequency mode selecting technologies were summarized from the perspective of obtaining narrower linewidth, and the power scaling technologies were summarized from the perspective of generating higher power. The current status of narrow linewidth fiber laser oscillator was reviewed, and the development of narrow linewidth fiber laser technologies was prospected.

**Key words:** fiber laser; narrow linewidth; single-frequency; high power

收稿日期: 2021-11-23; 修订日期: 2021-12-22

基金项目: 长沙市杰出创新青年培养计划 (kq2106005)

作者简介: 张万儒, 男, 硕士, 主要从事窄线宽单频光纤激光器方面的研究。

通讯作者: 粟荣涛, 男, 副研究员, 博士, 主要从事高能激光技术方面的研究。

## 0 引言

自 1964 年 Snitzer 等人研制出首台光纤激光器以来<sup>[1]</sup>, 由于其具有结构紧凑、热管理方便和光束质量优良等诸多优势, 光纤激光器受到科研人员的持续关注。随着双包层光纤、高亮度半导体等技术的发展, 光纤激光的输出功率已经达到万瓦量级<sup>[2-3]</sup>, 并在工业加工等领域得到广泛应用。遥感探测<sup>[4-6]</sup>、非线性频率转换<sup>[7-8]</sup>和光束合成<sup>[9]</sup>等领域对激光的线宽有特殊的要求。例如, 原子光钟要求激光的线宽达到 10 Hz 量级<sup>[10]</sup>; 光谱合成的激光线宽一般在数 10 GHz (0.1 nm 量级@1  $\mu\text{m}$  波段) 以内, 但激光功率一般需要达到千瓦以上<sup>[11-12]</sup>。在应用需求的牵引下, 近年来窄线宽光纤激光受到研究人员的广泛关注, 取得了一系列重要进展<sup>[13-15]</sup>。

目前, 窄线宽的定义并无明确的线宽标准。通常情况下, 将光谱线宽在 0.1 nm 量级或更小的光纤激光器称为窄线宽光纤激光器; 其中, 只有一个纵模输出的窄线宽光纤激光器被称为单频光纤激光器。光纤激光的线宽主要受掺杂光纤增益谱、谐振腔结构、选模元件光谱特性等方面的影响。目前常用的掺杂光纤主要有掺镱光纤 (YDF)、掺铒光纤 (EDF) 和掺铥光纤 (TDF) 等, 分别输出 1  $\mu\text{m}$ 、1.5  $\mu\text{m}$  和 2  $\mu\text{m}$  波段的激光。上述掺杂光纤的增益谱均在 100 nm 量级, 光纤光栅制备水平的提升已经使其具备了产生光谱宽度小于 0.1 nm 的窄线宽激光输出的能力, 但是要得到更窄线宽的光纤激光, 需要进行谐振腔和选模元件的优化设计。研究人员基于线形腔、环形腔和复合腔等谐振腔, 实现了窄线宽激光输出; 进一步利用超短腔、F-P 标准具、饱和吸收体等方法对激光器的纵模进行选择, 实现了单频光纤激光输出。窄线宽光纤激光的功率提升一般采用“激光器+放大器”的主振荡功率放大 (MOPA) 结构。MOPA 结构采用一个或者多个放大器对激光功率进行放大, 能够在保持激光线宽的同时提升输出功率。基于该结构, 单频光纤放大器与窄线宽光纤放大器已经分别实现了数百瓦<sup>[16-18]</sup>与数千瓦<sup>[19-21]</sup>的输出功率。提升窄线宽光纤激光器的输出功率可以减小放大器的级数, 甚至不需要放大器, 这样就能简化窄线宽激光系统。研究人员针对窄线宽光纤激光的功率提升开展了深入研究, 成功研制了百瓦量级

的窄线宽光纤激光器<sup>[22-23]</sup>。文中将从谐振腔、单频选模和功率提升三个方面系统地介绍窄线宽光纤振荡器的关键技术及研究进展, 展望窄线宽光纤激光器的发展, 为窄线宽光纤激光器的研究提供参考。

## 1 谐振腔典型结构

根据谐振腔的结构不同, 可以将其分为线形腔、环形腔和复合腔。线形腔窄线宽光纤激光器主要有分布式布拉格反射激光器 (DBR) 和分布式反馈激光器 (DFB) 两种, 具有结构稳定、抗外界干扰能力强和不易出现跳模等优点, 很适合商业化应用。环形腔为行波腔, 可以消除线形驻波腔中的空间烧孔效应, 有利于激光器的单纵模运行。复合腔指在一个激光器包含多个谐振腔, 可以是线形腔、环形腔或者两者的组合, 同时满足所有谐振腔的谐振条件的模式才能起振。

### 1.1 线形腔

线形腔是光纤激光器常用的结构, 利用掺杂光纤作为增益介质, 光纤光栅作为腔镜形成谐振腔, 其纵模间隔  $\Delta\nu_q$  与腔长  $L$  成反比关系, 当腔长  $L$  足够短时, 谐振腔的纵模间隔  $\Delta\nu_q$  就能足够大, 在光栅的带宽范围  $\Delta\nu_0$  内就可能只存在少数几个甚至一个纵模, 从而使激光器实现窄线宽输出。线形腔结构简单, 可以构建超短腔实现单频激光输出。目前, 典型的线形短腔光纤激光器包括 DBR 和 DFB 两种。

DBR 窄线宽光纤激光器是在较短 (一般为数厘米长) 的掺杂光纤两端写入一对光纤布拉格光栅 (FBG), 形成线形谐振腔, 如图 1 所示。其中, 高反射率光栅 (HR FBG) 作为全反射镜, 低反射率光栅作为输出耦合镜 (OC FBG)。1988 年, 南安普顿大学的 Jauncey 等人报道了首台 DBR 单频光纤激光器, 在 1082 nm 处线宽约 1.3 MHz, 最大输出功率 0.78 mW<sup>[24]</sup>。1991 年, 美国联合技术研究中心的 Ball 等人在 0.5 m 的掺铒光纤两端写入 FBG, 获得了线宽小于 47 kHz、最大功率 5 mW 的窄线宽单频输出<sup>[25]</sup>。两年后 Ball 等人又将腔长进一步减小至 2 cm, 输出线宽为 15 MHz, 最大功率接近 140  $\mu\text{W}$ <sup>[26]</sup>。1992 年, 贝尔实验室的 Zyskind 等人在掺铒光纤上全息写入光栅, 构造了 1 cm 长的 DBR 单频光纤激光器, 输出功率仅有 57  $\mu\text{W}$ <sup>[27]</sup>。由于增益介质仅有几厘米, 传统石英光纤的增益系数也难以提升, 早期的短腔 DBR 激光器输出功率受到限制。



图 1 线形短腔 DBR 光纤激光器结构示意图

Fig.1 Structure of linear short cavity DBR fiber laser

随着高浓度稀土离子掺杂光纤制备技术的发展,特别是高掺杂磷酸盐、锗酸盐和铝硅酸盐等多组分光纤的出现,掺杂光纤的增益系数得到极大增加,DBR 单频激光器的输出功率也得到大幅提升。2003 年, NP Photonics 公司的 Spiegelberg 等人采用铒镱共掺磷酸盐光纤作为增益介质,获得了 200 mW 的 1.5  $\mu\text{m}$  激光输出,线宽小于 2 kHz<sup>[28]</sup>。2004 年和 2007 年,该公司先后利用厘米量级的掺铒磷酸盐光纤与掺铥锗酸盐光纤,在 1  $\mu\text{m}$  和 2  $\mu\text{m}$  波段分别实现了 200 mW<sup>[29]</sup> 和 50 mW<sup>[30]</sup> 的单频输出。2009 年,亚利桑那大学的 Wu 等人基于掺铥的锗酸盐光纤在 2053 nm 处实现了 60 mW 的单频输出,线宽在 10 kHz 量级<sup>[31]</sup>。2010 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的潘政清等人报道了一台基于铒镱共掺磷酸盐光纤的 DBR 短腔光纤激光器,获得了 100 mW、5 kHz 的单频输出,工作波长为 1535 nm<sup>[32]</sup>。同年,华南理工大学的 Xu 等人采用 2 cm 的铒镱共掺磷酸盐光纤,在 1.5  $\mu\text{m}$  处获得了功率超过 300 mW、线宽为 1.6 kHz 的单频输出<sup>[33]</sup>。随后,他们采用掺铒磷酸盐光纤和掺铥锗酸盐光纤,在 1  $\mu\text{m}$  和 2  $\mu\text{m}$  波段均实现了数百 mW 的单频激光输出<sup>[34-38]</sup>。2011 年,南安普顿大学 Zhang 等人的借助掺铥铝硅酸盐光纤在 1943 nm 处实现了 580 mW 的 DBR 单频激光输出<sup>[39]</sup>。这些多组分光纤有效促进了 DBR 单频光纤激光器的发展,但是多组分光纤的制作难度大,而且与传统的硅基光纤器件熔接损耗大,因此,研究人员对基于石英光纤的稀土掺杂光纤展开了进一步研究。天津大学主要研究了掺铥与掺铥的石英光纤<sup>[40-43]</sup>,其中基于掺铥石英光纤在 2  $\mu\text{m}$  波段已经实现了超过 50 mW 的单频输出,线宽为 36 kHz<sup>[43]</sup>。西北大学的 Sun 等人利用高掺铥石英光纤制得了 160 mW、6 kHz 的 DBR 单频光纤激光器<sup>[44]</sup>。此外,YAG 晶体衍生光纤也具有较强的稀土离子掺杂能力,并且与传统的硅基光纤器件相容性好,近年来也成为高增益光纤的重要研究内容。2019 年,山东大学的 Liu 等人报道了一台基于 Yb:YAG 晶体衍生光纤的激光器,

输出功率 110 mW,线宽 65 kHz<sup>[45]</sup>。2021 年,上海大学的研究人员利用 Yb:YAG 晶体衍生光纤均实现了超过 255 mW 的单频输出<sup>[46]</sup>。

DFB 光纤激光器通过在掺杂光纤上写入一个非均匀光栅来构建谐振腔,如图 2 所示。DFB 光纤激光器通常使用相移光栅,即在光栅的中间位置加入数十  $\mu\text{m}$  的间隙,从而引起相位的突变(一般是  $\pi/2$  或  $\pi$ )。相位突变处两边的光栅可以等效为两个反射镜,构成一个超短的线形谐振腔。由于相移结构的存在,光栅的反射谱中会产生一个极窄的透射窗口,只有一个低损耗的纵模可以起振,从而输出单频激光。透射窗口的中心波长与引入的相移量成线性正比关系<sup>[47]</sup>,当选择合适的间隙使相移量为  $\pi$  时,透射窗口的中心波长正好与光栅的布拉格波长重合。这样只需一个光栅便可以实现光的反馈与波长的选择,使 DFB 激光器具备更好的稳定性。

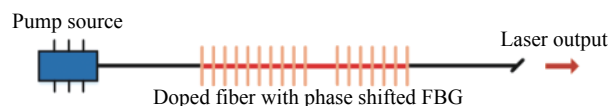


图 2 线形短腔 DFB 光纤激光器结构示意图

Fig.2 Structure of linear short cavity DFB fiber laser

1994 年,南安普顿大学的 Kringlebotn 等人采用加热光栅引入相移的方法在 1.5  $\mu\text{m}$  波段实现了首台单频 DFB 光纤激光器<sup>[48]</sup>。次年,瑞典皇家理工学院的 Asseh 等人利用紫外线照射光栅来引入永久相移,在 10 cm 的掺铥光纤上实现了 1047 nm 的窄线宽激光输出<sup>[49]</sup>。随后,研究人员基于 DFB 结构在 1  $\mu\text{m}$ 、1.5  $\mu\text{m}$ 、2  $\mu\text{m}$  和 2.8  $\mu\text{m}$  处均实现了单频输出。2007 年,俄罗斯科学院的 Babin 等人报道的单频单偏振 DFB 光纤激光器,工作在 1093 nm,输出线宽小于 10 MHz,输出功率 4.5 mW<sup>[50]</sup>。2008,亚利桑那大学的 Schülzgen 等人通过包层泵浦 3.5 cm 的铒镱共掺磷酸盐光纤,在 1.5  $\mu\text{m}$  处获得了 160 mW 的最大输出功率,线宽为 50 kHz<sup>[51]</sup>。2004 年,丹麦技术大学的 Agger 等人将波长扩展到 1.7  $\mu\text{m}$ ,利用 4.7 cm 长的掺铥硅酸盐光纤制得了 1 mW 的 DFB 单频激光器<sup>[52]</sup>。2007 年与 2008 年,南安普顿大学的研究人员采用同带泵浦的方式,在 2  $\mu\text{m}$  波段基于掺铥光纤的 DFB 结构上先后获得了 318 mW 与 875 mW 的高功率单频输出<sup>[53-54]</sup>。2015 年,

拉瓦尔大学的 Bernier 等人将波长拓宽至中红外波段,在高掺铒氟化物光纤上刻写  $\pi$  相移光栅,实现了功率为 12 mW、波长 2 794.4 nm、线宽小于 20 kHz 的单频激光输出<sup>[55]</sup>。

DFB 单频光纤激光器的进一步发展得益于增益光纤制作和光栅刻写技术水平的提升。2012 年,北京交通大学的 Li 等人利用 MCVD 技术制备大有效面积的掺铒光纤,获得了功率为 43.5 mW、线宽为 9.8 kHz 的 DFB 激光器<sup>[56]</sup>。2019 年,新西伯利亚国立大学的 Wolf 等人利用 MCVD 方法制作的掺铒光纤,在 2.07  $\mu\text{m}$  处实现了 53 mW、10 kHz 的 DFB 单频输出<sup>[57]</sup>。SPCVD 制备方法可以获得更高的稀土掺杂浓度,从而在实现更短的有效腔长<sup>[58]</sup>。2017 年,俄罗斯科学院的 Butov 等人利用该技术制作了 16 mm 长的高掺铒石英光纤来搭建 DFB 激光器,输出线宽小于 8 kHz,功率约 10 mW<sup>[59]</sup>。以磷酸盐为代表的多组分光纤可以有效提高稀土离子的掺杂浓度,但其光敏性很差,传统刻写方法很难制得超短腔 DFB 激光器,利用飞秒脉冲刻写技术可以在非光敏光纤上制备 FBG。2018 年,俄罗斯科学院西伯利亚分院的 Skvortsov 等人通过飞秒脉冲逐点刻写的方式,在 32 mm 的掺铒光纤上实现了 0.7 mW 的 DFB 单频输出<sup>[60]</sup>。2020 年,该课题组利用特别设计的复合高掺铒磷酸盐光纤,结合飞秒脉冲逐点刻写技术,将 DFB 有效腔长缩短至仅 5.3 mm,输

出线宽为 3 kHz,输出功率为 0.5 mW<sup>[61]</sup>。2021 年,江苏师范大学的 Sun 等人将飞秒脉冲逐点刻写改进为逐行刻写,基于 26 mm 长的相移光栅获得了 3.9 mW 的功率输出,线宽小于 1 kHz<sup>[62]</sup>。

表 1 所示为近 10 年来线形腔单频光纤激光器的代表性研究结果。从表中可以看出,DBR 单频光纤激光器具有更高的功率提升能力。此外,通过对 FBG 进行温度、应力控制,还可以实现光纤激光器输出波长的调谐<sup>[63-64]</sup>。DFB 单频光纤激光器通过直接在掺杂光纤上刻写光栅来实现,避免了光纤的熔接,其腔长相对较短,可以实现更稳定的单频运转,但受限于掺杂光纤的光敏性与高泵浦功率下相移光栅的热效应等,DFB 单频光纤激光器功率输出功率相对较低。总体而言,DBR 与 DFB 两种结构的光纤激光器均具有结构简单、稳定性好等优点,方便窄线宽光学系统的集成与封装,适合商业化生产和应用,研制出的便携式单频光纤激光器整机,具有抗电磁干扰、防震等功能,高低温环境均可正常工作,是应用于激光雷达、光纤水听器、分布式传感、相干通信等领域的优质光源。两种超短腔结构均需要高掺杂浓度的增益光纤来保证足够的增益,而且很难插入其他光学元件来实现诸如偏振控制等功能。而环形腔结构使用较长的腔长可以解决此类问题,因此基于环形腔结构的窄线宽光纤激光器也得到了大量研究。

表 1 线形短腔单频光纤激光器典型研究进展

Tab.1 Typical progress of linear short cavity single-frequency fiber lasers

Wavelength band/ $\mu\text{m}$	Year	Institution [Ref.]	Structure	Fiber type	Wavelength/ nm	Power/ mW	Linewidth/ kHz
1	2011	South China Uni. of Tech. (SCUT), China <sup>[65]</sup>	DBR	Yb <sup>3+</sup> phosphate	1060	408	<7
	2012	NP Photonics, USA <sup>[66]</sup>	DBR	Yb <sup>3+</sup> phosphate	976	>100	<3
	2013	SCUT, China <sup>[36]</sup>	DBR	Yb <sup>3+</sup> phosphate	1064	230	<2
	2016	SCUT, China <sup>[67]</sup>	DBR	Yb <sup>3+</sup> phosphate	1120	62	5.7
	2016	Tianjin Uni.(TJU), China <sup>[41]</sup>	DBR	Nd <sup>3+</sup> silica	930	1.9	44
	2016	Beijing Uni. of Tech.(BJUT), China <sup>[68]</sup>	DBR	Yb <sup>3+</sup> silica	1063	21.78	0.54
	2017	Northwest Uni., China <sup>[44]</sup>	DBR	Yb <sup>3+</sup> silica	1030	160	6
	2017	Inst. of Radio Eng. and Elec., Russia <sup>[59]</sup>	DFB	Yb <sup>3+</sup> silica	1030	10	<8
	2019	Shandong Uni., China <sup>[45]</sup>	DBR	Yb:YAG silica	1064	110	65
	2020	SCUT, China <sup>[69]</sup>	DBR	Nd <sup>3+</sup> silica	1120	15	71.5
	2021	Uni. of Arizona(UA), USA <sup>[70]</sup>	DBR	Nd <sup>3+</sup> phosphate	915	13.5	-
	2021	Shanghai Uni., China <sup>[46]</sup>	DBR	Yb:YAG silica	1030	>255	171

续表 1

Continued Tab.1

Wavelength band/ $\mu\text{m}$	Year	Institution [Ref.]	Structure	Fiber type	Wavelength/ nm	Power/ mW	Linewidth/ kHz
1	2021	UA, USA <sup>[71]</sup>	DBR	Yb <sup>3+</sup> phosphate	1050	1150	9.6
	2021	National Uni. of Defense Tech.(NUDT), China <sup>[72]</sup>	DFB	Yb <sup>3+</sup> silica	1030	154	18
1.2	2012	NP Photonics, USA <sup>[73]</sup>	DBR	Ho <sup>3+</sup> ZBLAN	1200	10	<100
1.5	2012	Shanghai Inst. of Optics and Fine Mech.(SIOM), China <sup>[6]</sup>	DBR	Er <sup>3+</sup> -Yb <sup>3+</sup> phosphate	1540.3	114.2	4.1
	2012	SCUT, China <sup>[74]</sup>	DBR	Er <sup>3+</sup> -Yb <sup>3+</sup> phosphate	1550	>50	<2
	2012	Beijing Jiaotong Uni., China <sup>[56]</sup>	DFB	Er <sup>3+</sup> -	1544.768	43.5	9.8
	2013	UA, USA <sup>[75]</sup>	DBR	Er <sup>3+</sup> -Yb <sup>3+</sup> phosphate	1538.2	550	<60
	2017	SCUT, China <sup>[76]</sup>	DBR	Er <sup>3+</sup> -Yb <sup>3+</sup> phosphate	1603	21	<1.9
	2018	BJUT, China <sup>[77]</sup>	DBR	Er <sup>3+</sup> -	1552	-	<0.3
	2018	NUDT, China <sup>[78]</sup>	DFB	Er <sup>3+</sup> -Yb <sup>3+</sup> phosphate	1534.7	10.44	-
	2020	Russian Acad. of Sciences, Russia <sup>[61]</sup>	DFB	Er <sup>3+</sup> phosphate	1550	0.5	3.5
	2021	Jiangsu Normal Uni., China <sup>[62]</sup>	DFB	Er <sup>3+</sup> silica	1550	3.9	<1
	2021	Shenzhen Uni., China <sup>[79]</sup>	DBR	Er <sup>3+</sup> -	1549.3	13.17	0.491
1.7	2021	SCUT, China <sup>[80]</sup>	DBR	Tm <sup>3+</sup> germanate	1727	12.4	8.6
2	2011	Uni. of Southampton, UK <sup>[39]</sup>	DBR	Tm <sup>3+</sup> alumino-silicate	1943	580	-
	2015	SCUT, China <sup>[37]</sup>	DBR	Tm <sup>3+</sup> germanate	1950	102.5	<6
	2017	TJU, China <sup>[43]</sup>	DBR	Tm <sup>3+</sup> silica	1920	50	36
	2018	SCUT, China <sup>[38]</sup>	DBR	Tm <sup>3+</sup> germanate	1950	617	12.55
	2019	Inst. of Aut. and Electrometry, Russia <sup>[57]</sup>	DFB	Ho <sup>3+</sup> silica	2070	53	10
2.8	2015	Laval Uni., Canada <sup>[55]</sup>	DFB	Er <sup>3+</sup> fluoride	2794.4	12	<20

1.2 环形腔

在线性腔中,相向传播的光束会干涉形成驻波,导致增益介质中出现空间烧孔效应,易于在谐振腔内形成模式竞争。而环形腔为行波谐振腔,配合光隔离器、环形器等单向器件,可以使光波在谐振腔中单向传播,从而克服驻波腔相向传播带来的空间烧孔效应。

环形腔的典型结构如图 3 所示,主要由波分复用器(WDM)、耦合器、掺杂光纤和光隔离器或环形器构成,通过 WDM 实现泵浦光的注入,耦合器在谐振腔中起到光反馈的作用,同时实现激光的输出,腔内插入的光隔离器或者光纤环形器是使激光在行波状态下运行,保证激光传输方向的单一性。1990 年,南安普顿大学的 Morkel 等人提出利用行波环形腔结构来避免空间烧孔效应对腔内多纵模振荡的影响,得到了输出频谱宽度为 60 kHz 的单纵模输出<sup>[81]</sup>。1999 年,韩国科技研究所的 Jhon 等人采用保偏环形腔结构,利用环形器确保光波的单向传播,获得了线宽小于 0.7 kHz、最大输出功率为 2.75 mW 的单频输出<sup>[82]</sup>。此

后,不同单位的研究人员借助环形腔结构,实现了 kHz 量级的单频输出。2007 年,日本东北大学的 Suzuki 等人利用用保偏相移光栅结合环形腔,实现了 6 kHz 单频输出<sup>[83]</sup>。2013 年,华南理工大学 He 等人采用环形腔结构搭建激光器,以高浓度的掺铥锗酸盐光纤为增益介质,实现了最大输出功率超过 200 mW、线宽小于 7 kHz 的单频输出<sup>[84]</sup>。2018 年,伊朗阿米尔卡比尔理工大学的 Poozesh 等人在环形腔内采用保偏掺铥光纤实现了 35 mW 的稳定单频输出,相应的线宽小于 6 kHz<sup>[85]</sup>。2020 年,西北大学的 Wang 等人利用环形腔搭建了一台 1068 nm 的全保偏单频掺铥双向光纤激光器,输出线宽为 7.43 kHz<sup>[86]</sup>。

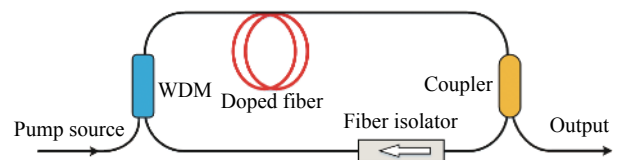


图 3 环形腔典型结构示意图

Fig.3 Typical structure of ring cavity

环形腔解决了线形腔存在的空间烧孔效应问题,也方便加入其他器件来实现对激光的操控,比如加入可调谐滤波装置来实现宽波长范围的可调谐连续激光输出<sup>[87-89]</sup>。但是,环形腔结构器件的增多会带来额外的插入损耗,降低激光器的输出效率。此外,较长谐振腔会使激光器易受外界振动、温度等因素的干扰,降低其稳定性,同时还会减小其纵模间隔,不利于选出单纵模起振。因此,环形腔结构需要配合其他选模技术才能实现稳定的窄线宽输出,相关选模技术及其代表性结果将在第二章节详细介绍。

### 1.3 复合腔

通常情况下激光器的谐振腔只有一个,谐振频率与腔长  $L$  有关。如果一个激光器存在多个谐振腔,不同腔中谐振光的频率要保持一致,根据游标效应 (Vernier effect) 原理,则只有同时满足每个谐振频率要求的激光才可以起振<sup>[90]</sup>,每个谐振腔谐振频率为各自纵模间隔的整数倍,则复合腔的有效纵模间隔是每个谐振腔纵模间隔的最小公倍数,从而有效增大了激光器的纵模间隔,有利于实现单频输出。以最简单的两个谐振腔为例,当这两个腔的腔长相差很小时,复合腔的纵模间隔  $\Delta\nu$  取决于两腔的腔长差  $|L_1-L_2|$ ,此时满足:

$$\Delta\nu = \frac{c}{n|L_1-L_2|} \quad (1)$$

当两个腔中一个腔的腔长远小于另一个腔的腔长时,复合腔的纵模间隔  $\Delta\nu$  可以近似用小腔长的纵模间隔来表示,此时满足:

$$\Delta\nu = \min\left(\frac{c}{nL_1}, \frac{c}{nL_2}\right) \quad (2)$$

由上述分析可知,增大复合腔的纵模间隔,可以调整两个腔的腔长基本一致,但是,在光纤激光系统中,谐振腔对外界环境的变化非常敏感,采用这种方法实现的复合腔稳定性较差,而且由于实验过程中光纤的切割与熔接等操作,难以控制两个腔的精确长度。另一种方法是将其中的一个腔的腔长做到很小,远小于另一个腔长,但是由于耦合器本身长度与熔接的限制,搭建腔长很小的环形腔难度也比较大。实验过程中通常使用长腔来获得足够的增益,采用一个或多个短腔来获得较大的纵模间隔,合理设计每个谐振腔的长度,同时结合窄带光栅,来实现窄线宽甚至单频输出;如果再辅以单频选模技术,可以实现百 Hz 量级

的窄线宽输出,而且结合可调谐光栅可以实现大范围的可调谐输出。根据复合腔的结构不同,可以分为线形复合腔、环形复合腔和线形/环形复合腔三类。

线形复合腔由多个线形腔构成。1988年,英国圣安德鲁斯大学的 Barnsley 等人采用 Fox-Smith 谐振腔结构,利用耦合器构建了两个长度相近的谐振腔,控制两个腔的光程之比为  $1.13 \pm 0.02$ ,增大了复合腔的纵模间隔,实现了 8.5 MHz 的单纵模运转<sup>[91]</sup>,如图 4 所示。2003年,国防科技大学的庞华伟等人利用两个线形腔的长度失调达到滤波选模的目的<sup>[92]</sup>,但由于腔镜的反射谱太宽、线形腔空间烧孔效应的存在以及较长的腔长等问题使激光器稳定性欠佳。2009年,北京交通大学的 Xu 等人报道了一种基于三个 FBG 的线形双腔全光纤结构,其结构如图 5 所示<sup>[93]</sup>,通过直接在光敏掺铒光纤上刻写 FBG,实现了线宽小于 5 kHz 的单频输出。2013年,该单位的冯亭等人又将四个 FBG 写入一段光敏掺铒光纤中,形成不对称的三腔结构,根据游标效应计算复合腔的纵模间隔约为 26 GHz,从而实现了单纵模运转<sup>[94]</sup>。同年,山东大学的 Zhao 等人利用三个光栅构成了一个线形复合腔结构来增大纵模间隔,其中一个光栅为相移光栅进行滤波选模,实现了 900 Hz 的单频输出<sup>[95]</sup>。

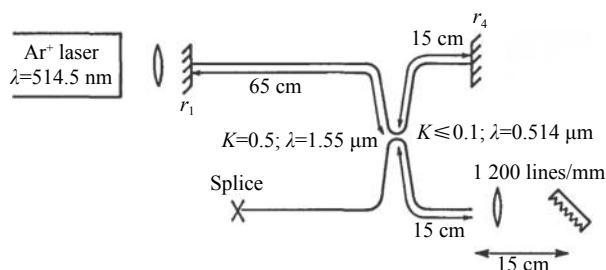


图 4 Fox-Smith 线形复合腔结构示意图<sup>[91]</sup>

Fig.4 Structure of Fox-Smith linear composite cavity<sup>[91]</sup>

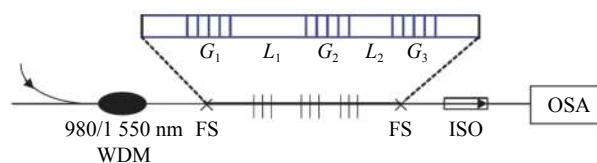


图 5 双线形腔全光纤单频激光器结构示意图<sup>[93]</sup>

Fig.5 Structure of double linear cavities all fiber single-frequency laser<sup>[93]</sup>

环形复合腔的典型结构如图 6 所示,一般由主环形腔和一个或多个的次级环形腔构成,在主环形腔上获得足够的增益,次级环形腔来获得比较大的纵模间隔。1996 年,滑铁卢大学的 Zhang 等人搭建了一台复合环形腔单频光纤激光器,两个谐振腔的纵模间隔分别为 6.8 MHz 和 2 GHz,激光器输出线宽小于 5 kHz,平均输出功率 17 mW<sup>[96]</sup>。2007 年,中国科学院半导体研究所的张欣等人在主环形腔中插入三个长度不等的无源次级环形腔进行滤波,并结合 FBG 形成多环形腔掺铒光纤激光器结构,在 1550 nm 处输出功率约 3.6 dBm,线宽小于 500 Hz<sup>[97]</sup>。2013 年,该单位的田允允等人基于复合环形腔结构结合波长可调的 FBG 构建了宽调谐光纤激光器,得到的单频输出线宽仅为 0.7 kHz<sup>[98]</sup>。2016 年,河北大学的 Feng 等人搭建了三环形腔结构的双波长单频激光器,线宽小于 1 kHz<sup>[99]</sup>。2017 年,西北大学的 Lu 等人以复合环形腔结构搭建了一台 60 nm 宽带调谐的单频光纤激光器,平均线宽 8.8 kHz<sup>[87]</sup>。2019 年,北京邮电大学的 Wang 等人在主环形腔上引入一个凸形环与 Sagnac 环,凸形环基于游标效应增大纵模间隔, Sagnac 环内加入未泵浦的掺铒光纤进行纵模选择,实现了 840 Hz 的单频输出<sup>[100]</sup>。2020 年,安徽光学精密机械研究所的刘昊炜等人采用抗外界干扰能力强的保偏光纤构建复合环形腔,精细设计每个次级腔的长度,利用游标效应充分增加有效纵模间距,输出线宽小于 850 Hz,最大输出功率 50 mW<sup>[101]</sup>。2021 年,刘昊炜等人利用相似结构,继续实现了 400 Hz 的单频输出<sup>[102]</sup>。同年,西北大学的丁建一等人利用环形复合腔结构实现了可调谐的单频激光输出,中心波长 1064 nm 处的线宽为 3.325 kHz<sup>[103]</sup>。天津大学的 Zhang 等人通过加入三个子环,在 1.7 μm 处实现了 1.9 kHz 的单频输出,功率高达 1.11 W<sup>[104]</sup>。

线形/环形复合腔在主线性腔上获得增益,通过

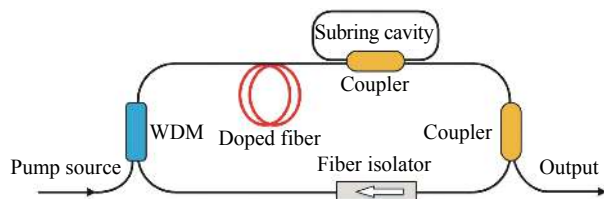


图 6 环形复合腔典型结构示意图

Fig.6 Typical structure of ring composite cavity

环形器连接环形腔来增大纵模间隔。2014 年,北京交通大学的冯婷等人采用一种主线形腔和环形腔结合的复合腔结构,在线形结构上利用 7 m 的掺铒光纤获得增益,同时利用 2.5 m 未泵浦的掺铒光纤作为可饱和吸收体进行滤波选模,通过环形器连接环形腔,并在环形腔加入一个子环形腔来增大纵模间隔,最终实现了 650 Hz 的单频输出<sup>[105]</sup>,其结构如图 7 所示。在此结构基础上,冯婷等人通过设计不同的子环形腔结构,分别实现了约 1 kHz<sup>[106]</sup>和百 Hz<sup>[107]</sup>的双波长单频激光器。

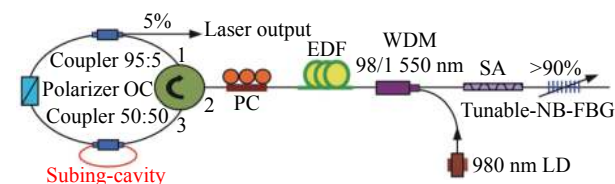


图 7 主线形腔+环形腔单频激光器结构示意图<sup>[105]</sup>

Fig.7 Structure of main linear cavity + ring cavity single-frequency laser<sup>[105]</sup>

## 2 单频选模技术

利用不同的选模技术对谐振腔内的纵模进行选择,只允许单一纵模产生振荡,可以实现单频激光输出。单频激光线宽窄、相干性好,在高精度激光探测与传感等领域具有重要应用前景。采用单频选模技术,科研人员已经实现了 kHz 甚至 Hz 量级的超窄线宽单频光纤激光器。该章节将对不同的单频选模技术进行介绍。

### 2.1 法布里珀罗腔选模技术

法布里-珀罗 (F-P) 腔的透射光谱具有波长选择性,可以放置于光纤激光器的腔内,或者作为反射镜,实现对激光纵模的选择。F-P 腔的透射谱为准分立谱,其谱线宽度与腔镜反射率成反比。此外,由于 F-P 腔的厚度  $d$  比激光器的腔长  $L$  小得多,其两个相邻共振峰之间的频率间隔要比激光器的纵模间隔大得多。所以通过合理控制 F-P 腔的反射率和腔长,可以使激光器的增益线宽内只包含一个透射峰,从而实现模式选择。在光纤激光器中,通常利用光纤布拉格光栅 (FBG) 作为腔镜来构建光纤光栅 F-P 腔,其结构见图 8,在光纤的两端接入两个布拉格波长相同的 FBG 便构成一个 F-P 腔。与普通 F-P 腔不同,FBG 只能为其

反射带以内的光波提供反馈而形成谐振峰,利用一对窄带 FBG 并合理缩短间距  $d$ , 实现单频激光输出。

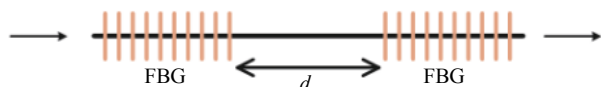


图 8 光纤光栅 F-P 腔结构示意图

Fig.8 Structure of fiber Bragg grating F-P cavity

将 F-P 腔作为选模器件放置于腔内,是一种实现单频激光输出的有效技术手段。1991 年,美国加州理工学院的 Namkyoo 等在环形腔掺铒光纤激光器中插入两个 F-P 腔滤波器实现了单频输出<sup>[108]</sup>。随着光纤光栅制备技术的发展,光纤光栅 F-P 腔得到了深入的研究。2005 年,亚利桑那大学的 Polynkin 报道了一种单频激光器,在短单向环形腔的基础上,引入一对窄带 FBG 形成 F-P 腔,通过控制其长度来抑制跳模,在 1.5  $\mu\text{m}$  波段实现了 1 W 的高功率单频输出<sup>[109]</sup>。2008 年,新加坡南洋理工大学 Cheng 等人在环形腔的内部加入 F-P 腔用来选择出单一纵模,其结构如图 9 所示,该 F-P 腔两个 FBG 间的距离约 5 mm,获得了工作波长在 1 556 nm,线宽约为 2.5 kHz 的激光输出<sup>[110]</sup>。2009 年,加拿大湖首大学的 Das 等人在环形腔中插入 F-P 腔滤波器,基于铒镱共掺的增益光纤获得了 250 mW 的最大输出功率,单频线宽约 12 MHz<sup>[111]</sup>。2019 年,北京交通大学的白燕等人在环形腔中插入 F-P 腔滤波选模,在 2  $\mu\text{m}$  波段实现了激光器的单纵模运转和超窄线宽输出,在 0.01 s 的测量时间下线宽约为 300 Hz<sup>[112]</sup>。

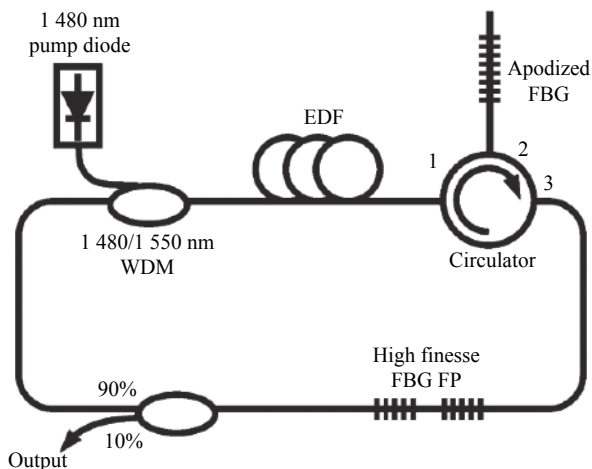


图 9 基于 F-P 腔选模的单频光纤激光器结构示意图<sup>[110]</sup>

Fig.9 Structure of single-frequency fiber laser based on F-P cavity mode selecting<sup>[110]</sup>

此外, F-P 腔还可以作为谐振腔的反射镜为激光提供反馈,同时发挥滤波选模作用,获得窄带透射光谱。2007 年,电子科技大学的伍波等人在线形腔的两端分别加入一个光纤光栅 F-P 腔用来选模,同时作为激光器谐振腔的腔镜,使用双向泵浦与两端输出的方式获得了线宽小于 7 kHz 的激光输出,其实验装置如图 10 所示<sup>[113]</sup>。该课题组继续在此结构上加入光隔离器后,实现了单端输出的 10 kHz 激光器<sup>[114]</sup>。2015 年,华南理工大学的莫树培等人借助光纤光栅 F-P 腔与一个宽带 FBG 分别作为 DBR 结构两端的腔镜,增益介质采用 15 mm 的铒镱共掺磷酸盐光纤,光纤光栅 F-P 腔作为输出耦合器与选模元件,实现了小于 780 Hz 的单频输出<sup>[115]</sup>。

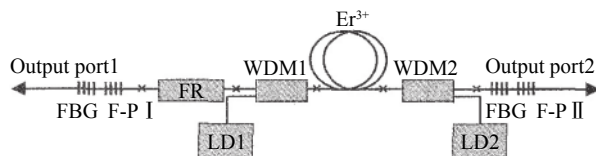


图 10 双光纤光栅 F-P 腔单频光纤激光器结构示意图<sup>[113]</sup>

Fig.10 Structure of double fiber grating F-P cavities single-frequency fiber laser<sup>[113]</sup>

## 2.2 饱和吸收体选模技术

在光纤激光器中利用饱和吸收体对腔内纵模进行选择是实现单频窄线宽输出的常用方法。饱和吸收体具有对弱激光信号吸收强、对强激光信号吸收弱的特点,未泵浦的掺杂光纤和二维材料是目前最常用的两种饱和吸收体。通过结合 FBG 或者置于环形结构中,利用饱和吸收效应达到选频和抑制模式跳变的目的。

采用未泵浦掺杂光纤作为饱和吸收体进行单频选模的典型结构如图 11 所示。向左传输的激光经 FBG 反射,入射光和反射光相互干涉,在未泵浦的掺杂光纤上形成驻波,波节与波腹处的光强出现明显差异,饱和吸收特性使未泵浦的掺杂光纤的吸收系数沿光纤呈现周期性变化,形成瞬态布拉格光栅,作为可饱和吸收体的掺铒光纤长度远远大于普通 FBG 的长度,因此形成的瞬态 FBG 的反射带宽会远窄于普通 FBG 的带宽,从而选出单一纵模,抑制多模振荡。基于此原理,饱和吸收体选模技术被广泛应用于各种窄线宽光纤激光器。

1994 年,以色列理工学院的 Horowitz 等人首次



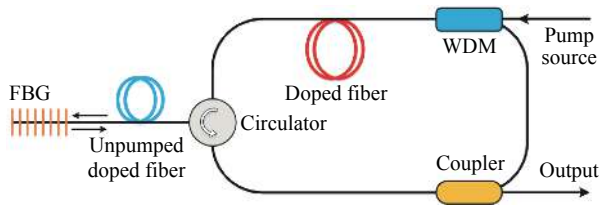


图 11 基于未泵浦掺杂光纤选模的单频光纤激光器结构示意图

Fig.11 Structure of single-frequency fiber laser based on unpumped doped fiber mode selecting

在线形腔中加入一段掺铒光纤作为饱和吸收体来抑制跳模, 实现了 5 kHz 的激光的输出<sup>[116]</sup>。2001 年, 中国科学技术大学的俞本立等人在环形腔中利用未泵浦的掺铒光纤的驻波饱和和吸收效应, 获得了线宽小于 0.5 kHz, 功率大于 1 dBm 的稳定单频光纤激光<sup>[117]</sup>。同年, 南加利福尼亚大学的 Song 等人搭建了一台 40 nm 可调谐的环形腔单频激光器, 引入饱和吸收体作为窄带滤波器, 输出线宽为 750 Hz<sup>[118]</sup>。2006 年, 北京理工大学的陈淑芬等人采用较低浓度的掺铒光纤作为饱和吸收体, 制得了线宽仅为 30 Hz 的单模超窄线宽光纤激光器<sup>[119]</sup>。2008 年, 该单位的张明也利用相似的结构实现了线宽小于 100 Hz、最大输出功率 2.779 mW 的单频激光器<sup>[120]</sup>。2017 年, 山东省科学院激光研究所的 Chen 等人基于未泵浦的掺铒光纤饱和吸收体实现了 1 μm 波段的单频输出, 在 7 mW 的输出功率时线宽小于 500 Hz<sup>[121]</sup>。2020 年, 天津大学的 Xie 等人借助级联泵浦的方法, 采用 1018 nm 的光纤激光泵浦得到 1064 nm 的单频输出, 利用未泵浦的增益光纤作为饱和吸收体确保单纵模输出, 激光器线宽为 1.4 kHz, 最大输出功率 231 mW<sup>[122]</sup>。2021 年, 该单位的 Zhang 等人利用未泵浦的掺铒光纤饱和吸收体在 1.7 μm 处实现了高效的单频输出, 输出功率约 407 mW, 线宽 4.4 kHz<sup>[123]</sup>。

采用未泵浦的非保偏掺杂光纤作为饱和吸收体

时, 激光的偏振态容易发生变化, 影响形成的驻波的稳定性, 采用未泵浦的保偏掺杂光纤作为饱和吸收体, 可以提高往返光束的干涉光强衬比度, 形成更加稳定的驻波。2006 年, 国防科技大学的 Meng 等人报道了一台基于保偏掺铒光纤饱和吸收体的光纤激光器, 输出功率为 4.7 mW, 线宽小于 1.5 kHz<sup>[124]</sup>。2008 年, 北京航空航天大学欧攀等人通过偏振控制器与保偏环形器获得了单偏振激光输出, 结合饱和吸收体选模技术, 使激光器线宽小于 0.5 kHz, 最大功率大于 35 mW<sup>[125]</sup>。2010 年, 电子科技大学的代志勇等人利用保偏光栅制作的 F-P 腔作为反射镜, 并结合未泵浦的掺铒光纤作为饱和吸收体选择出单一纵模, 搭建了一台工作在 1550.4 nm、功率 43.7 mW、线宽 2 kHz 的单频激光器<sup>[126]</sup>。2013 年, 国防科技大学的 Xu 等人利用 2 m 长未泵浦的保偏掺铒光纤作为可饱和吸收体, 与 FBG 共同构成动态吸收光栅, 选择单纵模形成振荡, 测得线宽为 1.3 kHz<sup>[127]</sup>。2019 年, 浙江大学的 Yin 等人基于环形腔结构引入保偏掺铒光纤作为窄带滤波器, 实现了 2 μm 波段的单频激光器, 其振荡器的输出功率为 61.6 mW<sup>[128]</sup>。2021 年, 该单位的 Qi 等人在线形腔中加入未泵浦保偏掺铒光纤, 在 1064 nm 处实现了 144 mW、4.5 kHz 的单频输出<sup>[129]</sup>。

除了采用 FBG 使激光在饱和吸收体内形成双向传输 (如图 11 所示) 外, 还可以通过耦合器形成环形光路, 使激光在未泵浦的掺杂光纤中形成双向传输并发生干涉, 从而利用饱和吸收效应形成动态光栅。例如, 可以采用两个耦合器 (coupler1 与 coupler2) 组成 F-P 光纤环结构, 在环内加入一段未泵浦掺杂光纤, 如图 12 所示。其中, F-P 环产生梳状谱来增大谐振腔的纵模间隔, 未泵浦掺杂光纤形成动态光栅进行滤波选模。采用该结构, 天津理工大学的研究人员通过调控两个耦合器的耦合比, 有效压缩了激光器线宽<sup>[130-131]</sup>。

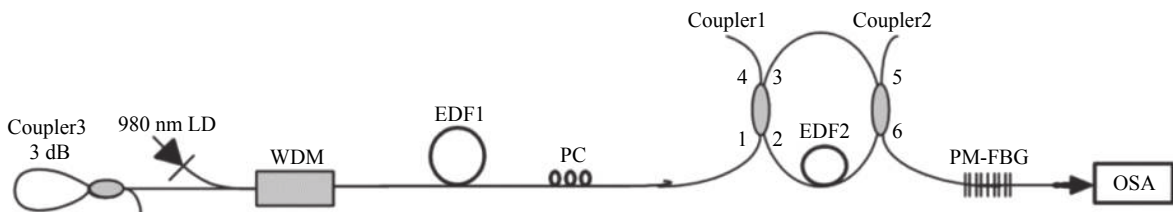


图 12 基于 F-P 光纤环滤波器的窄线宽光纤激光器结构示意图<sup>[130]</sup>

Fig.12 Structure of narrow linewidth fiber laser based on F-P fiber loop filter<sup>[130]</sup>

另一种常用的结构是光纤环形镜,如图 13 所示,将一个耦合器的两端通过未泵浦的掺杂光纤连接成环,采用 3 dB 耦合器时,光将全部耦合回入射端口,光纤环起到全反射镜的作用,故称其为环形镜。在环形镜中加入一个偏振控制器(PC)来控制传输光束的偏振态,使两束光相互干涉形成驻波,未泵浦的掺杂光纤由于饱和吸收特性产生瞬态窄带布拉格光栅,滤除腔内多余的纵模,实现单个纵模振荡。1999 年,南加利福尼亚大学的 Havstad 等人首次提出环形镜饱和吸收体的全光纤窄带滤波器<sup>[132]</sup>。2005 年,日本电气通信大学的 Huang 等人在线形腔中引入环形镜滤波器,以未泵浦的掺铒光纤进行纵模选择,实现了 2 kHz、14 mW 的单频输出<sup>[133]</sup>。2011 年,汕头大学的 Sun 等人在环形镜结构中熔接一段高双折射率光纤,应用于环形腔光纤激光器的窄带滤波<sup>[134]</sup>。2013 年,西北大学的 Yin 等人在线形腔上利用环形镜饱和吸收体进行滤波选模,同时作为线形腔一端的腔镜起到光反馈的作用,在 1064 nm 处获得了 32 mW 的单频输出,线宽约几 kHz,其结构如图 13 所示<sup>[135]</sup>。2014 年,华中科技大学的 Yang 等人在环形镜结构中加入未泵浦的掺铒光纤作为饱和吸收体来实现单频输出,测得 3 dB 线宽约 0.016 nm<sup>[88]</sup>。2017 年,台湾逢甲大学的 Yeh 等人也在复合腔结构上借助环形镜饱和吸收体实现了单纵模运转<sup>[136]</sup>。2019 年,天津大学的 Shi 等人搭建了一台在 2 μm 波段的环形腔单频激光器,利用环形镜中未泵浦的掺铒光纤作为饱和吸收体选模,实现了 20.9 mW 的连续单频输出<sup>[137]</sup>。

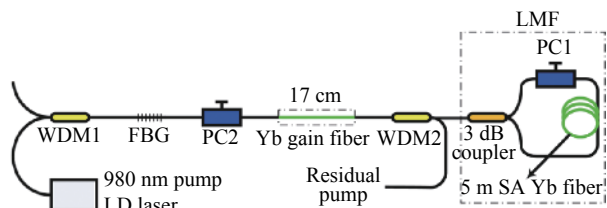


图 13 基于环形镜滤波器的单频光纤激光器结构示意图<sup>[135]</sup>

Fig.13 Structure of single-frequency fiber laser based on loop mirror filter<sup>[135]</sup>

为了获得好的饱和吸收特性,未泵浦的掺杂光纤往往需要数米的长度,难以实现光学系统的集成与简化,借助二维材料的饱和吸收特性可以克服这一缺点。二维材料对于弱光信号具有较高的吸收系数,强

光信号则以较低的损耗通过,因此可以用来抑制谐振腔中的多纵模振荡以及杂散噪声信号,并且二维材料种类丰富,为寻找性能更优的饱和吸收体提供了可能。2014 年,济南大学的 Zhou 等报道了一台双波长单频光纤激光器,利用石墨烯的可饱和吸收效应进行窄带滤波,每个波长的激光线宽均小于 7.3 kHz<sup>[138]</sup>。同年,深圳大学课题组的 Chen 等人采用拓扑绝缘体 Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> 作为可饱和吸收体制作单频光纤激光器,测得线宽小于 10 kHz,输出功率可达 23 mW,其结构如图 14 所示<sup>[139]</sup>。2015 年,西北大学的 Deng 等人在利用石墨烯薄膜作为饱和吸收体插入到环形镜中进行纵模选择,在 1064 nm 实现了 16 mW 的单频输出<sup>[140]</sup>。次年,该单位的陆宝乐等人继续在相似的结构上利用 MoS<sub>2</sub> 为饱和吸收体,实现了 15 mW、6 kHz 的激光输出<sup>[141]</sup>。2019 年,深圳大学的 Sun 等人报道了一台基于超薄金属有机框架(MOFs)的单频光纤激光器,在光纤环形镜结构中放置 MOFs 作为饱和吸收体,输出线宽为 3.2 kHz,最大功率 1.07 mW,中心波长 1549.9 nm<sup>[142]</sup>。

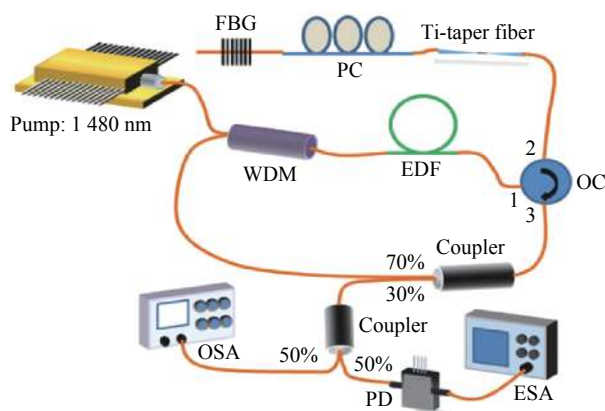


图 14 基于二维材料选模的单频光纤激光器结构示意图<sup>[139]</sup>

Fig.14 Structure of single-frequency laser based on two-dimensional material mode selecting<sup>[139]</sup>

### 2.3 线形腔空间烧孔效应消除技术

线形腔中相向传播的光场之间干涉叠加形成驻波,会引发空间烧孔效应,导致多纵模形成振荡,激光器线宽随之展宽。为了解决这一问题,除了前面介绍的环形行波腔结构外,还可以借助一定的方法使相向传输的激光无法发生干涉,从而避免了驻波的产生,使腔内光场的空间分布变得均匀,也就不会发生空间烧孔效应。目前主要采用以下三种方式来阻止驻波的产生,使相向传输激光的频率不同<sup>[143]</sup>、偏振方向相

互垂直<sup>[113-114, 144-145]</sup> 或者使用圆偏振光<sup>[146-148]</sup>。

利用声光调制器改变往返光的频率, 可以消除空间烧孔效应。1992 年, 德国汉堡工业大学的 Sabert 等人在线形腔的两端分别插入一个施加声光调制器 (AOM), AOM 使激光产生  $f_A=80$  MHz 的频移。如图 15 所示<sup>[143]</sup>。激光的一个往返传输过程会两次经过 AOM, 分别产生  $2f_A$  的频率上移和频率下移, 使前向和后向传输的激光由于  $2f_A$  的频率差而无法干涉形成驻波, 消除了空间烧孔效应, 获得了约 5 kHz 的单频输出。但是, 该方法中的声光调制器会增大激光器的成本与体积, 不利于实现全光纤化结构, 影响光纤系统中的集成与应用。

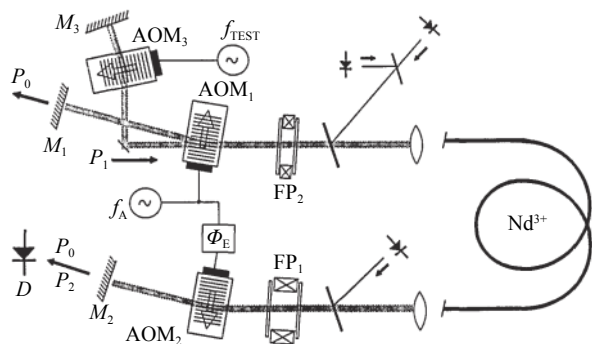


图 15 利用声光调制器实现非相干的结构示意图<sup>[143]</sup>

Fig.15 Structure of achieving incoherent based on acousto-optic modulator<sup>[143]</sup>

利用法拉第旋转器可以改变线偏振光的偏振方向, 使往返传输光的偏振方向相互垂直, 也可以消除空间烧孔效应。1996 年, 东京大学的 Takushima 等人在线形谐振腔内借助 45° 的法拉第旋转器 (FR), 使前向和后向传输的激光为相互垂直的线偏振光, 从而破坏了线形腔中驻波形成的条件, 消除了空间烧孔效应, 提高了纵模稳定性, 最终获得了线宽 1 MHz 的激光输出, 实验装置如图 16 所示<sup>[144]</sup>。2013 年, 中国科学技术大学的 Guo 等人利用 45° 法拉第旋转镜, 使往返光束的偏振态改变 90°, 实现了空间烧孔效应的抑制, 输出线宽小于 3.5 kHz, 输出功率为 5.32 dBm<sup>[145]</sup>。

利用偏振控制器将光变为圆偏振光, 使得腔内光场叠加后空间分布均匀, 同样可以消除空间烧孔效应。斯坦福大学的 Eutuhov 等人最先提出这种方法并成功应用在红宝石固体激光器中, 称之为扭转模技术<sup>[149]</sup>。1996 年, 韩国科学技术研究院的 Chang 等人

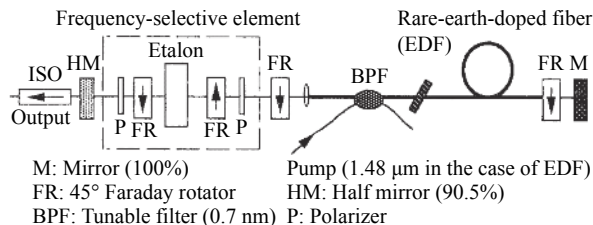


图 16 利用法拉第旋转器实现非相干的实验装置<sup>[144]</sup>

Fig.16 Structure of achieving incoherent based on Faraday rotator<sup>[144]</sup>

首次在线形腔中应用扭转模技术, 在增益光纤的两端放置由四分之一波片构成的偏振控制器, 波片与线偏振光的偏振方向成 45°, 线偏振的激光经过后会变为圆偏振光, 相向传播的圆偏振光之间无法产生驻波, 轴向能量密度均匀, 从而消除增益介质中的空间烧孔效应, 最终实现了线宽小于 10 kHz 的单频激光输出<sup>[146]</sup>。2010 年, 美国 Orbits Lightwave 公司提出一种虚拟环形腔结构, 可以避免空间烧孔效应<sup>[150]</sup>。2014 年, 华南理工大学的莫树培将这一结构应用于短线形腔中, 如图 17 所示, 激光在腔内两次往返才实现一次自再现过程, 即一次完整的振荡实际是激光走了两个来回, 故称其为虚拟折叠腔, 光子寿命随之延长, 也消除了空间烧孔效应, 从而压窄了线宽, 提高了激光器的稳定性, 实现了小于 820 Hz 的超窄单频激光输出, 功率约为 7 mW<sup>[147]</sup>。随后, 他们在此结构基础上再结合慢光效应增加光子寿命, 进一步实现了 600 Hz、1 mW 的激光输出<sup>[148]</sup>。2016 年, 西北大学的原莉梅等人引

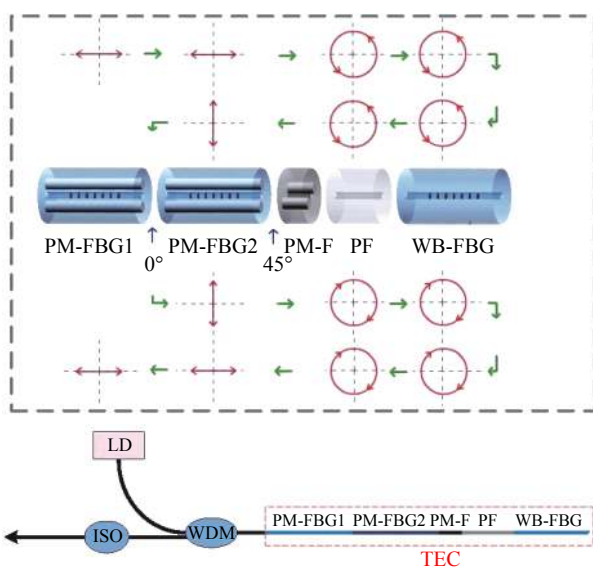


图 17 虚拟折叠腔单频光纤激光器结构示意图<sup>[147]</sup>

Fig.17 Structure of virtual folded cavity single-frequency fiber laser<sup>[147]</sup>

入偏振控制器来消除线形腔内的空间烧孔效应,抑制了多纵模振荡,实现了波长为 1083 nm,线宽小于 4 kHz,最大输出功率 46 mW 的线形腔单频光纤激光器<sup>[151]</sup>。

### 2.4 受激布里渊散射窄线宽激光器技术

受激布里渊散射 (SBS) 是一种泵浦光与斯托克斯 (Stokes) 光通过弹性声波场发生的非线性相互作用。泵浦光通过电致伸缩产生声波,声波反过来对介质的折射率产生周期性调制,使得介质形成一个折射率光栅。泵浦光经过光栅的衍射后,在光纤中产生后向传输的斯托克斯光。SBS 过程中的声波、泵浦光和斯托克斯之间遵循能量的守恒,相当于一个泵浦光子产生了一个斯托克斯光子和声子,所以输出斯托克斯光与泵浦光之间存在一个频移  $\nu_B$ <sup>[152]</sup>:

$$\nu_B = \frac{2n_p v_A}{\lambda_p} \quad (3)$$

式中:  $v_A$  为声速;  $\lambda_p$  为入射泵浦光的波长;  $n_p$  为有效折射率。利用峰值位于布里渊频移处的布里渊增益谱来表征斯托克斯光的形成,其增益谱具有洛伦兹频谱的轮廓<sup>[153]</sup>,谱宽与声子的寿命有关,所以相比于通常的增益介质,其增益谱宽  $\Delta\nu_B$  很窄,仅为几十 MHz。布里渊激光器利用 SBS 作为增益,可以将线宽较宽的泵浦光转换为线宽极窄的斯托克斯光。

1991 年,麻省理工学院的 Smith 等人报道了首台全光纤布里渊激光器,实现了 30 Hz 的激光输出<sup>[154]</sup>。但由于较小的布里渊增益系数和较低的输出耦合比,导致输出功率偏低。所以布里渊光纤激光器一般在腔内加入掺杂光纤,利用掺杂光纤增益和布里渊增益两种放大作用实现较高功率的激光输出,其典型结构如图 18 所示。1996 年,悉尼大学的 Cowle 等人利用一段掺铒光纤与 100 m 的单模光纤,成功实现了首台混合增益的布里渊光纤激光器,在 1532 nm 处测得输出功率为 10 mW<sup>[155]</sup>。

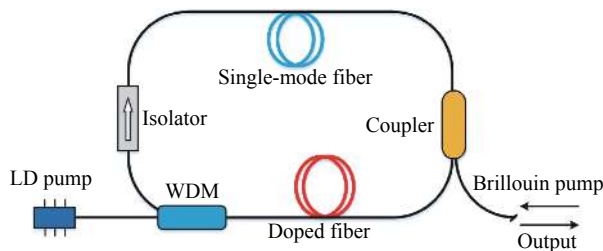


图 18 布里渊光纤激光器典型结构示意图

Fig.18 Typical structure of Brillouin fiber laser

对于普通单模光纤,其布里渊阈值功率高,布里渊增益系数小,因此需要足够的长度来获得足够的布里渊增益。但是,腔长过长容易产生多模振荡,而且会降低激光器稳定性,为了解决这一问题,研究人员在图 18 所示结构的基础上,通过利用复合环形腔<sup>[156-157]</sup>、超短环形腔<sup>[158-160]</sup>、F-P 腔<sup>[161]</sup>以及饱和吸收体<sup>[162]</sup>等结构提升了布里渊单频激光器的性能。2008 年,中国科学院半导体研究所的陈伟等人在环形布里渊激光器的基础上引入两个子环,形成复合环形腔结构,实现了稳定的单纵模输出,输出功率为 4 dBm,线宽小于 1.5 kHz<sup>[156]</sup>。2009 年,马来亚大学的 Harun 等人报道了一台采用 49 cm 掺铒掺铒光纤的超短环形腔布里渊激光器,这种增益光纤具有超高的非线性系数,可以同时提供线性掺铒增益和非线性布里渊增益,从而缩短了腔长,提高激光器的稳定性<sup>[158]</sup>。2012 年,国防科技大学的周会娟等人采用 4 m 的普通掺铒光纤同时提高两种增益,构造出超短环形腔布里渊激光器,实现了超过 10 mW 的稳定单频输出<sup>[159]</sup>。2015 年,该单位的陈默等人将掺铒光纤缩短至 45 cm,实现了 40 Hz 的窄线宽输出,最大输出功率约 6 mW<sup>[160]</sup>。2017 年,该课题组继续利用超短环形腔的布里渊光纤激光器实现了 6 Hz<sup>[163]</sup>和 1.8 Hz<sup>[164]</sup>的超窄线宽输出。2020 年,山东建筑大学的李亚方等人采用 10 m 的环形腔,利用 2 kHz 的 DFB 光纤激光器作为泵浦源,获得了功率超过 15 mW、线宽小于 100 Hz 的单频输出<sup>[165]</sup>。2014 年,电子科技大学的欧中华等人报道了一台超窄线宽布里渊光纤激光器,引入 F-P 腔辅助选模,实现了 30 Hz 的输出线宽,最大输出功率超过 3 mW<sup>[161]</sup>。2017 年,太原理工大学的 Liu 等人采用三环复合腔结构,同时利用未泵浦的掺铒光纤进行选模,获得了约 1 mW、65 Hz 的窄线宽输出<sup>[162]</sup>。

### 2.5 瑞利散射窄线宽随机激光器技术

光在光纤中进行长距离传播时,会由于光纤中随机分布的折射率不均匀而发生瑞利散射。在光纤结构的约束下,瑞利散射光后向传输并产生相干叠加。光纤中的瑞利散射非常微弱,需要经过一定长度的积累后才会变大。瑞利散射在长距离光纤中的反馈叠加可以等效为一个长距离的弱随机光栅,提供随机分布式反馈,并且具有极窄的透射谱<sup>[166]</sup>。2010 年,渥太华大学的 Zhu 等人首次研究了光纤中瑞利散射的线

宽压窄现象,测量了不同类型光纤的瑞利散射阈值及线宽<sup>[167]</sup>。研究人员利用掺杂光纤或 SBS 效应提供增益,利用瑞利散射效应产生的分布式反馈进一步压窄线宽,可以实现小于 1 kHz 的窄线宽输出。

利用掺杂光纤提供增益时,既要选取合适的光纤长度积累足够瑞利散射,又要采取有效措施抑制 SBS 效应。SBS 可以看作是声波场与光波场的相互作用的结果,可以使用非均匀光纤与微拉锥光纤阻碍声波的传输,从而达到抑制 SBS 的目的。2011 年,渥太华大学的 Zhu 等人使用 5.7 km 长的芯径和色散沿光纤连续变化的非均匀光纤来提高 SBS 阈值,基于瑞利散射的线宽压缩机制初步实现了小于 2 kHz 的激光输出<sup>[168]</sup>。同年,该单位的 Yin 等人利用 660 m 的单模光纤中的瑞利后向散射来实现随机分布式反馈与线宽压缩,输出线宽为 2.5-3.0 kHz<sup>[169]</sup>。2013 年,重庆大学 Zhu 等人借助微拉锥的方式使光纤的形状尺寸发生变化,以阻碍声波的传输来达到抑制 SBS 的目的,利用 110 m 微拉锥光纤中的瑞利散射效应压缩激光线宽,结合可变光衰减器调节腔内损耗并抑制边模,线宽压缩后的信号光反馈回主环形腔获得增益放大,然后再进入微拉锥光纤继续压缩线宽,经过多次循环实现了约 200 Hz 的超窄线宽输出<sup>[170]</sup>。利用相同

的方法,该课题组于 2014 年实现了 130 Hz 的单波长输出<sup>[171-172]</sup>,并于 2016 年实现了 700 Hz 的双波长输出<sup>[173]</sup>。2015 年,哈尔滨工业大学的 Gu 等人在 150 m 长的单模光纤上控制了 30 个锥点,有效提高了 SBS 阈值,基于瑞利散射效应将激光线宽压缩了约 3 倍,在 1550 nm 和 1554 nm 处分别获得了 445 Hz 和 425 Hz 的单频输出<sup>[174]</sup>。2017 年,该单位的 Cui 等人采用相似的方法,基于瑞利散射成功将 9.5 kHz 的线宽压缩至 200 Hz<sup>[175]</sup>。2018 年,重庆大学的 Li 等人采用 100 m 的单模光纤产生瑞利散射效应,经法拉第旋转镜反射后进入下一个循环,每次循环都会压窄激光线宽,最终得到了约 200 Hz 的激光输出,其结构如图 19 所示<sup>[176]</sup>。2020 年,该单位的 Iroegbu 等人在 DFB 激光器后加入瑞利反馈机制,通过优化单模光纤的长度,将 1310 nm、2 MHz 的 DFB 激光压缩至 580 Hz,输出功率稳定在 2 mW<sup>[177]</sup>。

SBS 效应的增益谱更窄,利用 SBS 作为增益,结合瑞利散射效应的线宽压缩机制,有潜力实现更窄的激光输出。2013 年,渥太华大学的 Pang 等人利用图 20 所示的结构,利用 25 km 的单模光纤提供 SBS 增益,5.4 km 的非均匀光纤产生瑞利散射压窄线宽并提供随机分布式反馈,观测到了约 10 Hz 的窄线宽尖峰<sup>[178]</sup>。2017 年,重庆大学的 Huang 等人报道了一种瑞利散射

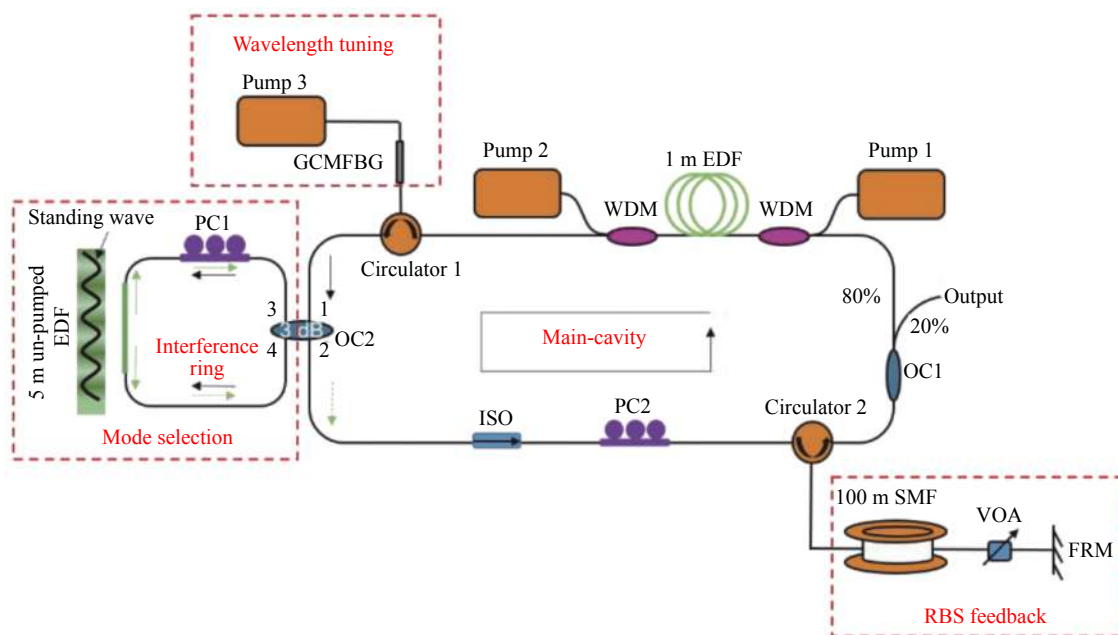


图 19 利用掺杂光纤增益的瑞利散射窄线宽随机光纤激光器结构示意图<sup>[176]</sup>

Fig.19 Structure of Rayleigh scattering narrow linewidth random fiber laser using doped fiber gain<sup>[176]</sup>

和布里渊散射相结合的方法,首先利用布里渊增益实现了约 200 Hz 的输出线宽,然后引入 50 m 的单模光纤构建瑞利散射结构进一步将线宽压窄至 75 Hz<sup>[179]</sup>。

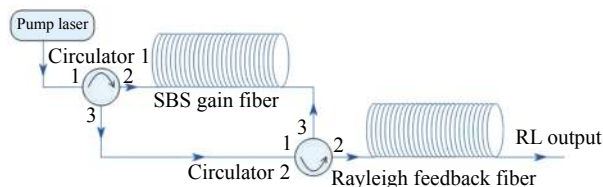


图 20 利用 SBS 增益的瑞利散射窄线宽随机光纤激光器结构示意图<sup>[178]</sup>

Fig.20 Structure of Rayleigh scattering narrow linewidth random fiber laser using SBS<sup>[178]</sup>

### 3 窄线宽功率提升技术

光束合成等应用领域需要高功率的窄线宽光源。由于受激布里渊散射、自相位调制等非线性效应的影响,光纤激光的高功率与窄线宽难以兼得。因此,在实际应用中,可以适当放宽对线宽的要求,以保证激光器的功率指标。目前,常用的方法是通过相位调制将单频激光的线宽进行展宽,或者搭建中等功率的窄线宽激光种子,再利用多级放大器进行功率放大,以获得千瓦级的窄线宽光纤激光<sup>[180]</sup>。提升窄线宽光纤激光振荡器的功率,可以有效地抑制放大过程中产生的放大自发辐射(ASE)以及杂散振荡<sup>[181]</sup>,减少放大器的级数,简化系统结构,提升系统稳定性,具有重要意义。

#### 3.1 非线性偏振窄线宽高功率光纤激光振荡器

相比于环形腔和复合腔,线形腔结构简单紧凑,光学元件少,光栅耐受功率高,因此一般采用线形腔实现更高功率的窄线宽激光。在较高泵浦功率下,DFB 结构中显著的热效应会改变光栅的折射率,导致光栅失相<sup>[182]</sup>,而 DBR 结构较长的腔长可以减少热效应的影响<sup>[183-184]</sup>。因此,DBR 结构成为实现高功率窄线宽振荡器的首选。提高窄线宽光纤激光振荡器的输出功率,主要是通过优化稀土离子掺杂和设计大模场面积的光纤,提高泵浦吸收,从而实现高功率输出。高功率窄线宽光纤激光振荡器需要重点考虑以下两方面的问题:一是振荡器的功率提升和时频特性将会受到受激布里渊散射和自相位调制等非线性效

应的影响,因此需要通过增加模场面积和减少光纤长度等方法提升非线性效应阈值;二是振荡器热效应会更加严重,由于光纤光栅的反射谱会向长波方向移动,两个光栅的温升出现差异时还会导致光谱失配,影响输出激光的光谱形态,需要对光栅等核心器件的工作温度进行精确控制。

采用磷酸盐或锗酸盐等多组分光纤以提高稀土离子的溶解度,科研人员研制高掺杂浓度的大模场双包层光纤,实现了瓦量级的窄线宽激光输出。2004 年,亚利桑那大学的 Li 等人利用光纤振荡器获得了瓦量级的功率输出,增益光纤采用 11 cm 的高掺杂铈共掺磷酸盐光纤,输出功率高达 1.5 W,激光器线宽为 1.2 nm,工作波长为 1535 nm,光束质量  $M^2 < 3$ <sup>[185]</sup>。2005 年,该单位的 Qiu 等人采用 5.5 cm 的大模场铈共掺磷酸盐光纤,结合介质镜与窄带 FBG,通过包层泵浦方式获得了 1.6 W 的单频激光输出,工作波长为 1550 nm<sup>[186]</sup>。同年,该单位的 Polynkin 等人基于 10 cm 的铈共掺磷酸盐光纤,同时利用扭模技术消除空间烧孔效应,在 1.5 μm 波段实现了 1.9 W 的单频输出<sup>[187]</sup>。2019 年,南安普顿大学的 Slimen 等人利用大模场、低数值孔径、高浓度 21 cm 长的掺铈锗酸盐在 2 μm 波段实现了 1.52 W 的窄线宽输出,3 dB 线宽小于 0.2 nm<sup>[188]</sup>。

光子晶体光纤(PCF)的模场面积更大,可以降低高功率传输时非线性效应的影响,而且内包层数值孔径大,可以提高泵浦光的耦合效率。因此,PCF 也适合用做高功率窄线宽光纤激光器的增益光纤<sup>[189]</sup>。2005 年,亚利桑那大学的 Li 等人首次利用微结构光子晶体光纤作为增益介质,模场面积达到 430 μm<sup>2</sup>,输出功率超过 3 W<sup>[190]</sup>。次年,他们又基于 35 mm 的微结构光子晶体光纤实现了 4.7 W 的输出功率<sup>[191]</sup>。2006 年,该单位的 Schülzgen 等人使用 3.8 cm 的光子晶体光纤,构建的 DBR 结构全光纤振荡器,输出功率 2.3 W,工作波长 1534 nm,3 dB 线宽约 0.03 nm,其结构如图 21 所示<sup>[192]</sup>。

上述短腔 DBR 窄线宽光纤振荡器利用多组分光纤和 PCF 作为增益介质,具有体积小、稳定性高等优点。但是,厘米量级的增益光纤提供的增益有限,仅能实现瓦量级的功率输出。为了实现更高功率输出,需要适当增加增益光纤的长度。2014 年,加拿大瑞尔森大学的 Zhou 等人采用 Waleed 等人提出的单模-多

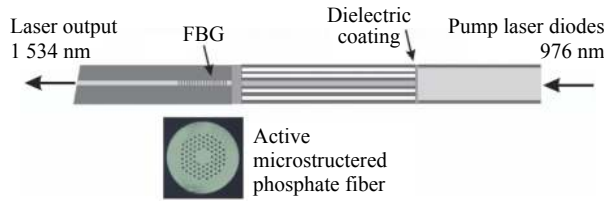


图 21 基于 PCF 的高功率窄线宽光纤激光器结构示意图<sup>[192]</sup>

Fig.21 Structure of high power narrow linewidth fiber laser based on PCF<sup>[192]</sup>

模-单模 (SMS) 结构<sup>[193]</sup>, 在 1.5 m 长的大模场掺镱多模光纤的两端熔接单模双包层光纤, 并在单模光纤上直接刻写 FBG, 搭建了全光纤谐振腔, 多模的增益光纤可以提高泵浦吸收来提升输出功率, 单模的 FBG 选择单横模来提高光束质量, 获得了工作波长 1088 nm, 输出功率 38.5 W, 光谱宽度 0.05 nm 的窄线宽激光<sup>[194]</sup>。2015 年, 在 SMS 结构的基础上, 国防科技大学的姜曼等人提出了一种单模-少模-单模 (SFS) 的结构, 增益介质采用 3.7 m 的少模双包层掺镱光纤, 以提高泵浦光的吸收率, 两侧熔接一对由单模光纤刻写的 FBG, 可以将输出光束限制在一个模式中, 实现高功率输出的同时还能保持出色的光束质量, 激光中心波长为 1018 nm, 100 W 输出功率下的 3 dB 线宽为 0.26 nm<sup>[22]</sup>。

### 3.2 线偏振窄线宽高功率光纤激光振荡器

非线性频率变换和相干合成等应用领域对激光的偏振度有较高的要求。采用偏振选择器件、保偏光栅正交熔接和光纤弯曲损耗等技术方案, 研究人员实现了线偏振窄线宽高功率激光输出。目前, 已报道的线偏振光纤振荡器的输出功率已经达到了千瓦量级, 对应线宽也展宽至几个纳米<sup>[195]</sup>。该节将重点介绍线偏振高功率窄线宽光纤振荡器的主要成果。

通过在激光谐振腔中插入偏振选择器件, 如起偏器或布儒斯特窗, 可以使激光器输出线偏振光。起偏器只允许平行于其起偏方向的分量通过, 垂直于其起偏方向的分量将被导出, 可以把随机偏振光转变为线偏振光, 因此, 在腔内插入起偏器可以使激光器产生并输出线偏振光。布儒斯特窗是基于布儒斯特原理设计的偏振器件, 光束以布儒斯特角入射到介质交界面上, 反射光中只含有垂直于入射面的偏振分量 (S 光), 平行于入射面的偏振分量 (P 光) 只存在于折射光中, 光束在谐振腔中经过多次往返, S 光大部分

被反射出去, P 光占据主导地位, 因此, 激光器可以实现以 P 光为主偏振态的线偏振输出。这种通过插入偏振选择器件来实现线偏振输出的方式, 会引入额外的损耗, 增加光学系统复杂程度与制作难度, 不利于实现全光纤系统, 稳定性也会受到限制。

2005 年, 日本电气通信大学的 Shirakawa 等人利用保偏光纤与起偏器搭建了一台空间光结构的线偏振光纤振荡器, 工作波长为 1064 nm, 偏振消光比 (PER) 为 16.7 dB, 最高输出功率 12 W, 3 dB 线宽为 0.16 nm<sup>[196]</sup>。2008 年, 瑞典皇家理工学院的 Jelger 等人在双包层保偏掺镱光纤和体布拉格光栅之间插入薄膜偏振器来控制腔内光束偏振态, 获得了 PER 为 15 dB、线宽 0.2 nm、最大输出功率高达 138 W 的线偏振激光输出, 其结构如图 22 所示<sup>[197]</sup>。2010 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所的刘侠等人在光纤输出端面上制作布儒斯特窗, 同时以 7.5 cm 的直径盘绕增益光纤, 实现了基于空间光结构的线偏振输出, PER 达到 21 dB, 且不随输出功率变化, 工作在 1085 nm, 最高输出功率为 10 W, 对应线宽为 0.2 nm<sup>[198]</sup>。

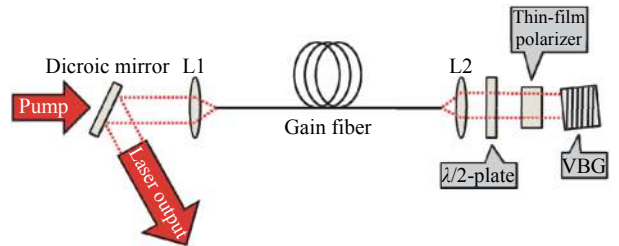


图 22 基于偏振器的线偏振高功率窄线宽光纤激光器结构示意图<sup>[197]</sup>

Fig.22 Structure of linearly polarized high power narrow linewidth fiber laser based on polarizer<sup>[197]</sup>

由于双折射效应, 保偏光栅的快轴和慢轴反射峰具有一定间隔, 光栅的反射带宽足够小时, 就可以实现两个反射峰的分离, 借助保偏增益光纤和保偏光栅来构建线性谐振腔, 并通过设计特殊的光栅参数和熔接方式使两个光栅的反射谱仅在一个偏振方向重叠, 从而使谐振腔内仅有一个偏振模式起振, 实现线偏振输出。这一方法没有额外插入偏振选择器件, 可以实现全光纤结构, 结构紧凑, 稳定性更高。

2007 年, 日本电气通信大学的 Shirakawa 等人基于保偏 FBG 进行偏振选模, 采取正交熔接的方式, 结合温度控制防止 FBG 的升温, 实现了线宽小于 20 pm、最高功率为 8 W 的 1064 nm 线偏振窄线宽激光输出,

PER 为 18 dB<sup>[199]</sup>。2012 年,中国科学院上海光学精密机械研究所的 Wang 等人利用正交熔接 FBG 的方式进行波长与偏振的选择,基于 4.2 m 的保偏掺镱光纤实现了 101 W 的窄线宽线偏振输出,线宽为 0.21 nm, PER 为 15 dB<sup>[200]</sup>。2013 年,中佛罗里达大学的 Willis 等人在 2 m 长的保偏掺镱光纤两端正交熔接保偏光栅来实现线偏振输出,最大偏振度 18.8 dB,中心波长为 1958.3 nm,输出线宽小于 80 pm<sup>[201]</sup>。2016 年,国防科技大学的黄龙等人报道了基于商用保偏双层掺镱光纤的高功率 1152 nm 线偏振光纤激光器,采用基于保偏 FBG 的偏振选择技术,通过主动加热增益光纤来抑制 ASE,获得了最高 13 W 的输出功率,PER 为 18 dB,3 dB 线宽为 0.14 nm(约 42 GHz)<sup>[202]</sup>。同年,该单位的姜曼等人采用 SMS 结构,利用大模场的增益光纤和较短的腔长(3.1 m)共同抑制了非线性效应带来的光谱展宽,采取保偏光栅正交熔接方式进行偏振选择,实现了中心波长 1064 nm、线宽小于 52 pm、输出功率 32.7 W、偏振消光比 23 dB 的激光输出,激光器结构如图 23 所示<sup>[203]</sup>。近期,该课题组的张嵩等人在正交熔接方式的基础上,通过光栅温度控制与双向泵浦,实现了 190.2 W 的高功率输出,3 dB 带宽约 159.8 pm, PER 为 13.7 dB。

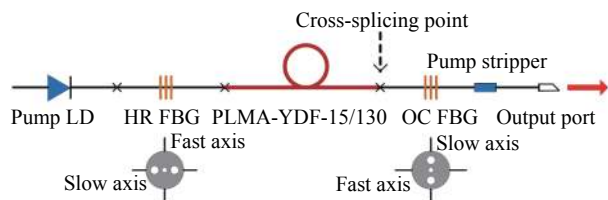


图 23 基于保偏光栅的线偏振高功率窄线宽光纤激光器结构<sup>[203]</sup>

Fig.23 Structure of linear polarized high power narrow linewidth fiber laser based on polarization maintaining gratings<sup>[203]</sup>

在光纤中,高阶模的弯曲损耗要大于低阶模的弯曲损耗。此外,在保偏光纤中,还具有快轴偏振模比慢轴偏振模弯曲损耗高的特点。因此,通过弯曲保偏增益光纤可以使高阶模与基模的快轴偏振模转变成

辐射模而损耗掉,谐振腔中只有基模的慢轴偏振模满足增益大于损耗的条件,从而使激光器实现线偏振输出。

2005 年, Nufern 公司的 Khitrov 等人报道了一台功率超过 300 W 的窄线宽线偏振激光器,采用大模场的保偏掺镱光纤作为增益介质,并以 9 cm 的直径进行盘绕,以消除不必要的高阶模和基模的快轴偏振模,实现了偏振消光比为 19 dB、输出功率达 306 W、线宽 0.57 nm 的激光输出<sup>[23]</sup>。2013 年,云南大学的苏岑等人报道了一台全光纤结构的线偏振掺镱光纤激光器,采用保偏光栅作为腔镜,并进行温度调节,使两个光栅快慢轴精确对准,同时将增益光纤缠绕于直径 8 cm 左右的圆柱上,实现了偏振消光比优于 22 dB 的线偏振输出,输出功率为 30.2 W,线宽约 0.11 nm<sup>[204]</sup>。2018 年,清华大学的黄昱升等人通过优化增益光栅的盘绕直径,实现了 PER 为 21.6 dB、最大功率 44.1 W、线宽 0.1 nm 的窄线宽激光输出,其结构如图 24 所示<sup>[205]</sup>。

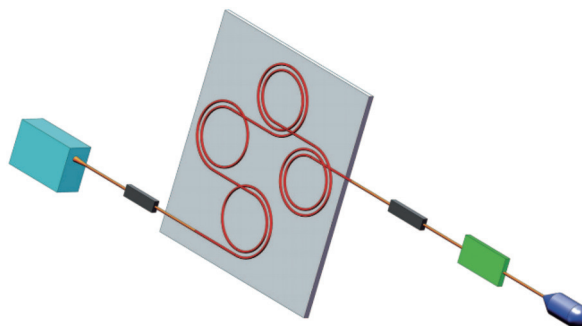


图 24 基于弯曲损耗的线偏振高功率窄线宽光纤激光器结构<sup>[205]</sup>

Fig.24 Structure of linear polarized high power narrow linewidth fiber laser based on bending loss<sup>[205]</sup>

综上所述,采用线性腔结构,研究人员实现了百瓦量级的窄线宽光纤激光器。结合偏振选择器件、保偏光栅正交熔接和光纤弯曲损耗等技术方案,近年来在高功率窄线宽的线偏振光纤激光器方面也取得了较大进展。近十年来窄线宽光纤振荡器功率提升的典型研究结果如表 2 所示。

表 2 高功率窄线宽光纤激光器典型研究进展

Tab.2 Typical progress of high power narrow linewidth fiber lasers

Year	Institution <sup>[Ref.]</sup>	Gain fiber	PRE/dB	Wavelength/nm	Power/W	Linewidth/nm
2012	SIOM, China <sup>[200]</sup>	4.2 m Yb <sup>3+</sup> PM	15	1120	101	0.21
2013	Uni. of Central Florida, USA <sup>[201]</sup>	2 m Tm <sup>3+</sup> PM	18.8	1958.3	4	<0.08



续表 2

Continued Tab.2

Year	Institution <sup>[Ref.]</sup>	Gain fiber	PRE/dB	Wavelength/nm	Power/W	Linewidth/nm
2013	Yunnan Uni., China <sup>[204]</sup>	5 m Yb <sup>3+</sup> PM	22-24	1 064.30	30.2	0.11
2014	Ryerson Uni., Canada <sup>[194]</sup>	1.5 m Yb <sup>3+</sup>	Non	1 088	38.5	0.05
2015	NUDT, China <sup>[22]</sup>	3.7 m Yb <sup>3+</sup>	Non	1 018	107.5	0.26
2015	HFB Photonics, China <sup>[206]</sup>	6 m Yb <sup>3+</sup>	Non	1 070	6	<0.1
2016	China Acad. of Eng. Phy.(CAEP), China <sup>[207]</sup>	11 m Yb <sup>3+</sup>	Non	1 080	240	0.39
2016	NUDT, China <sup>[202]</sup>	6.5 m Yb <sup>3+</sup> PM	18	1 152	13	0.14
2016	NUDT, China <sup>[203]</sup>	3.1 m Yb <sup>3+</sup> PM	23	1 064	32.7	<0.052
2017	NUDT, China <sup>[208]</sup>	1.3 m Yb <sup>3+</sup> PM	>15	1 064	45	≤0.044
2017	Tsinghua Uni., China <sup>[209]</sup>	Yb <sup>3+</sup>	Non	1 080.2	292	0.78
2018	Tsinghua Uni., China <sup>[205]</sup>	4 m Yb <sup>3+</sup> PM	21.6	1 063.26	44.1	0.1
2019	Tsinghua Uni., China <sup>[210]</sup>	10 m Yb <sup>3+</sup>	Non	1 070	80	0.0366
2019	Uni. of Science and Tech. of China, China <sup>[21]</sup>	4 m Yb <sup>3+</sup>	Non	1 064	80	0.1
2019	CAEP, China <sup>[211]</sup>	1.5 m+3 m Yb <sup>3+</sup>	Non	1 067	7.3	0.027
2020	CAEP, China <sup>[19]</sup>	1.5 m+1.5 m Yb <sup>3+</sup> PM	-	1 064	10.68	0.0307
2021	Tsinghua Uni., China <sup>[212]</sup>	5 m Yb <sup>3+</sup>	Non	1 070	145	0.078
2021	NUDT, China	4.5 m Yb <sup>3+</sup> PM	13.7	1 050	190.2	0.1598

#### 4 窄线宽光纤激光器的应用与展望

窄线宽光纤激光器在遥感探测、非线性频率转换、光束合成等领域具有重要的应用前景。在引力波探测方面,引力波信号极其微弱,即使黑洞合并产生的引力波在探测器几千米的干涉臂上也只能产生 $10^{-22}$ 量级的相对长度差,因此对激光器的时频稳定性提出了极高的要求。高功率的单频光纤激光以其噪声低、光束质量高的特点,被认为是下一代引力波探测的理想光源<sup>[213-214]</sup>。在非线性频率转换方面,利用窄线宽光纤激光可以提高转化效率,通过光参量振荡、倍频等非线性过程拓展激光的波长覆盖范围,满足不同波段的应用需求。比如,利用线宽为0.1 nm的1064 nm光纤激光泵浦MgO:PPLN晶体,可以得到中红外3.8 μm的光参量振荡激光输出<sup>[215]</sup>;通过倍频线宽小于1.5 MHz的1178 nm窄线宽光纤激光,可以获得589 nm的激光导星光源<sup>[8]</sup>。在光纤传感方面,窄线宽光纤激光器具有线宽窄、稳定性好、体积小等诸多优势,可以满足新型的长距离、高精度、高灵敏度的分布式光纤传感器的需求,已经应用于列车运行、桥梁大坝、石油电力等系统的安全监控<sup>[216]</sup>。在激光雷达方面,光源的相干性直接决定了整个系统的性能

优劣,使用超窄线宽、高稳定性的单频光纤激光作为相干光源,可以有效提高激光雷达的测量分辨率<sup>[217]</sup>,在大气探测、航空航天、三维成像、自动驾驶等领域有广泛的应用前景。在相干光通信方面,要求载波信号具有线宽窄、噪声低和可调谐特性<sup>[218]</sup>,更窄的线宽也能大幅提高光纤的信道数目,进行超密集的波分复用,同时降低光纤传输过程中的色散作用,实现大容量、长距离的信息传输。在光谱分析方面,光源的线宽越窄,光谱分析的精度越高,窄线宽单频光纤激光器可以帮助我们更精确灵敏地测量出物质的化学成分与相对含量。例如,研究人员利用布里渊光纤激光器获得了kHz级的超高光谱分辨率<sup>[219]</sup>。在光束合成方面,通常需要每路光束的功率达到千瓦以上。其中,相干合成要求每路子单元的激光有一定的相干长度,保证各路光束能够进行干涉,以获得良好的相干合成效果<sup>[9]</sup>;光谱合成中的色散组件其衍射或传输带宽有限,单路激光线宽越窄,参与合成的路数就越多,光谱合成总功率也就越大<sup>[11]</sup>。因此,实现万瓦量级的光纤激光,需要以高功率窄线宽光纤激光器作为基本单元,进行相干合成或光谱合成。

窄线宽光纤激光器经过几十年的发展,已经取得了长足的进步,通过进一步提高掺杂光纤的增益系

数,改进光栅刻写技术,未来发展将继续向着线宽更窄、功率更高的方向前进。在引力波探测等新应用的需求牵引下,频率更稳、噪声更低也受到了越来越多的关注。在窄线宽光纤激光器的研究中,一方面,需要结合应用需求,综合平衡线宽、功率、时频噪声等特性间的依赖关系,合理设计结构参数,优选技术方案;另一方面,需要摸清光纤中非线性效应、热学效应和力学效应等对光纤激光器的限制极限,进一步突破频率稳定<sup>[220]</sup>、噪声抑制<sup>[221]</sup>、非线性效应抑制等方面的关键技术,获得线宽更窄、功率更高、频率更稳和噪声更低的光纤激光输出。同时,窄线宽光纤激光器也将向着更宽光谱范围的方向发展,比如氟化物或硫族化物光纤较宽的透射窗口使其具有较大的潜力去拓展典型波段以外的窄线宽输出,通过进一步探索新型的稀土掺杂光纤,窄线宽光纤激光器的输出光谱范围将有望扩展至中红外与可见光波段,实现“任意波长”的激光输出。

## 5 结 论

综上所述,窄线宽光纤激光振荡器可以采用线形腔、环形腔和复合腔等形式的谐振腔结构。基于 DBR 结构和 DFB 结构的超短线形腔结构简单,且易于实现单纵模输出,是商用窄线宽光纤激光器主要采用的技术方案。结合 F-P 腔选模、饱和吸收体选模、空间烧孔效应消除、受激布里渊散射激光器和瑞利散射随机激光器等相关技术,可以利用各种类型的谐振腔获得单频激光。另一方面,基于大模场面积光纤的 DBR 结构是目前高功率窄线宽光纤激光振荡器主要采用的技术方案,结合光纤缠绕、光栅正交熔接等方法,还能获得线偏振激光输出。相信随着技术的不断发展,窄线宽光纤激光器的性能指标将不断提升,在科研、工业、医疗和国防等领域发挥更大的价值。

### 参考文献:

- [1] Koester C J, Snitzer E. amplification in a fiber laser [J]. *Applied Optics*, 1964, 3(10): 1182-1186.
- [2] Stiles e. New developments in IPG fiber laser technology [C]//5th International Workshop on Fiber Lasers, 2009.
- [3] O'connor M, Gapontsev V, Fomin V, et al. Power scaling of SM fiber lasers toward 10 kW [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference, 2009.
- [4] Cariou J P, Augere B, Valla M. Laser source requirements for coherent lidars based on fiber technology [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2006, 7(2): 213-223.
- [5] Diaz R, Chan S C, Liu J M. Lidar detection using a dual-frequency source [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(24): 3600-3602.
- [6] Yang F, Ye Q, Pan Z, et al. 100-mW linear polarization single-frequency all-fiber seed laser for coherent Doppler lidar application [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(2): 149-152.
- [7] Thompson R J, Tu M, Aveline D C, et al. High power single frequency 780 nm laser source generated from frequency doubling of a seeded fiber amplifier in a cascade of PPLN crystals [J]. *Optics Express*, 2003, 11(14): 1709-1713.
- [8] Taylor L R, Yan F, Calia D B. 50 W CW visible laser source at 589 nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrow-band Raman fibre amplifiers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8540-8555.
- [9] Zhou P, Su R T, Ma Y X, et al. Review of coherent laser beam combining research progress in the past decade [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401003. (in Chinese)
- [10] Guo F, Kong D, Zhang Q, et al. System development and clock transition spectroscopy detection of transportable <sup>87</sup>Sr optical clock [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(9): 0902001. (in Chinese)
- [11] Ma Y, Yan H, Sun Y, et al. Recent progress of key technologies for spectral beam combining of fiber laser with dual-gratings configuration(Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(1): 0103002. (in Chinese)
- [12] Zheng Y, Yang Y, Wang J, et al. 10.8 kW spectral beam combination of eight all-fiber superfluorescent sources and their dispersion compensation [J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12063-12071.
- [13] Shi W, Fang Q, Zhu X, et al. Fiber lasers and their applications [Invited] [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(28): 6554-6568.
- [14] Fu S, Shi W, Feng Y, et al. Review of recent progress on single-frequency fiber lasers [Invited] [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): A49-A62.
- [15] Yang C, Cen X, Xu S, et al. Research progress of single-frequency fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0114002. (in Chinese)
- [16] Robin C, Dajani I, Pulford B. Modal instability-suppressing, single-frequency photonic crystal fiber amplifier with 811 W output power [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 666-669.

- [17] Huang L, Wu H, Li R, et al. 414 W near-diffraction-limited all-fiberized single-frequency polarization-maintained fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 1-4.
- [18] Lai W, Ma P, Liu W, et al. 550-W single-frequency all-fiber amplifier with near-diffraction-limited beam quality [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0415001. (in Chinese)
- [19] Wang Y, Ke W, Peng W, et al. 3 kW, 0.2 nm narrow linewidth linearly polarized all-fiber laser based on a compact MOPA structure [J]. *Laser Physics Letters*, 2020, 17(7): 075101.
- [20] Ma P, Xiao H, Liu W, et al. All-fiberized and narrow-linewidth 5 kW power-level fiber amplifier based on a bidirectional pumping configuration [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e45.
- [21] Lin H, Tao R, Li C, et al. 3.7 kW monolithic narrow linewidth single mode fiber laser through simultaneously suppressing nonlinear effects and mode instability [J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 9716-9724.
- [22] Jiang M, Zhou P, Xiao H, et al. A high-power narrow-linewidth 1018 nm fiber laser based on a single-mode–few-mode–single-mode structure [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2015, 3(3): 71-74.
- [23] Khitrov V, Samson B, Manyam U, et al. Linearly polarized high power fiber lasers with monolithic PM-LMA-fiber and LMA-grating based cavities and their use for nonlinear wavelength conversion [C]//Conference on Fiber Lasers II: Technology, Systems, and Applications, 2005.
- [24] Jauncey I M, Reekie L. Single longitudinal mode operation of a Nd<sup>3+</sup>-doped fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 1988, 24(1): 24-26.
- [25] Ball G A, Morey W W. Standing-wave monomode erbium fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1991, 3(7): 613-615.
- [26] Ball G A, Glenn W H, Morey W W, et al. Modeling of short, single-frequency, fiber lasers in high-gain fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(6): 649-651.
- [27] Zyskind J L, Mizrahi V, Digiiovanni D J, et al. Short single frequency Er-doped fibre laser [J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(15): 1385-1387.
- [28] Spiegelberg C, Geng J, Hu Y, et al. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm (June 2003) [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 57-62.
- [29] Kaneda Y, Spiegelberg C, Geng J, et al. 200-mW, narrow-linewidth 1064.2-nm Yb-doped fiber laser [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, 2004.
- [30] Geng J, Wu J, Jiang S. Efficient operation of diode-pumped single-frequency thulium-doped fiber lasers near 2 μm [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(4): 355-357.
- [31] Wu J, Yao Z, Zong J, et al. Single frequency fiber laser at 2.05 μm based on Ho-doped germanate glass fiber [C]//Fiber Lasers VI: Technology, Systems, and Applications, 2009.
- [32] Pan Z, Cai H, Meng L, et al. Single-frequency phosphate glass fiber laser with 100-mW output power at 1535 nm and its polarization characteristics [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(1): 52-54.
- [33] Xu S, Yang Z, Liu T, et al. An efficient compact 300 mW narrow-linewidth single frequency fiber laser at 1.5 μm [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2): 1249-1254.
- [34] Mo S, Xu S, Huang X, et al. A 1014 nm linearly polarized low noise narrow-linewidth single-frequency fiber laser [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12419-12423.
- [35] Xu S, Li C, Zhang W, et al. Low noise single-frequency single-polarization ytterbium-doped phosphate fiber laser at 1083 nm [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 501-503.
- [36] Feng Z, Mo S, Xu S, et al. A compact linearly polarized low-noise single-frequency fiber laser at 1064 nm [J]. *Applied Physics Express*, 2013, 6(5): 052701.
- [37] Yang Q, Xu S, Li C, et al. A single-frequency linearly polarized fiber laser using a newly developed heavily Tm<sup>3+</sup>-doped germanate glass fiber at 1.95 μm [J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(9): 62-65.
- [38] Guan X, Yang C, Tian Q, et al. High-efficiency sub-watt in-band-pumped single-frequency DBR Tm<sup>3+</sup>-doped germanate fiber laser at 1950 nm [J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 6817-6825.
- [39] Zhang Z, Boyland A J, Sahu J K, et al. High-power single-frequency thulium-doped fiber DBR laser at 1943 nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(7): 417-419.
- [40] Fu S, Shi W, Lin J, et al. Single-frequency fiber laser at 1950 nm based on thulium-doped silica fiber [J]. *Opt Letters*, 2015, 40(22): 5283-5286.
- [41] Fang Q, Xu Y, Fu S, et al. Single-frequency distributed Bragg reflector Nd doped silica fiber laser at 930 nm [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(8): 1829-1832.
- [42] Fu S, Shi W, Lin J, et al. 2μm single frequency fiber laser based on thulium-doped silica fiber [C]//Fiber Lasers XIII: Technology, Systems, and Applications, 2016.
- [43] Fu S, Shi W, Sheng Q, et al. Compact hundred-mW 2 μm single-frequency Thulium-doped silica fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(11): 853-856.
- [44] Sun B, Jia J, Huang J, et al. A 1030 nm single-frequency

- distributed Bragg reflector Yb-doped silica fiber laser [J]. *Laser Physics*, 2017, 27(10): 105105.
- [45] Liu Z, Xie Y, Cong Z, et al. 110 mW single-frequency Yb:YAG crystal-derived silica fiber laser at 1064 nm [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4307-4310.
- [46] Wan Y, Wen J, Jiang C, et al. Over 255 mW single-frequency fiber laser with high slope efficiency and power stability based on an ultrashort Yb-doped crystal-derived silica fiber [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(5): 649-656.
- [47] Cai L, Wu F, Wang Y. Analysis for the reflective spectrum characteristics of phase-shifted fiber gratings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(8): 2070-2075. (in Chinese)
- [48] Kringlebotn J T, Archambault J L, Reekie L, et al. Er<sup>3+</sup>:Yb<sup>3+</sup>-codoped fiber distributed-feedback laser [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(24): 2101-2103.
- [49] Asseh A, Storoy H, Kringlebotn J T, et al. 10 cm Yb<sup>3+</sup> DFB fibre laser with permanent phase shifted grating [J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(12): 969-970.
- [50] Babin S A, Churkin D V, Ismagulov A E, et al. Single frequency single polarization DFB fiber laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(6): 428-432.
- [51] Schülzgen A, Li L, Nguyen D, et al. Distributed feedback fiber laser pumped by multimode laser diodes [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(6): 614-616.
- [52] Agger S, Povlsen J H, Varming P. Single-frequency thulium-doped distributed-feedback fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(13): 1503-1505.
- [53] Shen D Y, Zhang Z, Boyland A J, et al. Thulium-doped distributed-feedback fiber laser with > 0.3 W output at 1935 nm [C]//Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides, 2007.
- [54] Zhang. Z, Shen. D Y, Boyland. A J, et al. High-power Tm-doped fiber distributed-feedback laser at 1943 nm [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(18): 2059-2061.
- [55] Bernier M, Michaudbelleau V, Levasseur S, et al. All-fiber DFB laser operating at 2.8 μm [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(1): 81-84.
- [56] Li Q, Yan F, Peng W, et al. DFB laser based on single mode large effective area heavy concentration EDF [J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23684.
- [57] Wolf A A, Skvortsov M I, Kamynin V A, et al. All-fiber holmium distributed feedback laser at 2.07 μm [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(15): 3781-3784.
- [58] Butov O V, Rybaltovsky A A, Vyatkin M Y, et al. Short-cavity DFB fiber lasers [C]//Electromagnetics Research Symposium-spring, 2017.
- [59] Butov O V, Rybaltovsky A A, Bazakutsa A P, et al. 1030 nm Yb<sup>3+</sup> distributed feedback short cavity silica-based fiber laser [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): A43-A48.
- [60] Skvortsov M I, Wolf A A, Dostovalov A V, et al. Distributed feedback fiber laser based on a fiber Bragg grating inscribed using the femtosecond point-by-point technique [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(3): 035103.
- [61] Skvortsov M I, Wolf A A, Vlasov A A, et al. Advanced distributed feedback lasers based on composite fiber heavily doped with erbium ions [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 14487.
- [62] Sun W, Shi J, Yu Y, et al. All-fiber 1.55 μm erbium-doped distributed-feedback laser with single-polarization, single-frequency output by femtosecond laser line-by-line direct-writing [J]. *OSA Continuum*, 2021, 4(2): 334-344.
- [63] Ball G A, Morey W W. Continuously tunable single-mode erbium fiber laser [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(6): 420-422.
- [64] Ibsen, M., Eggleton, et al. Broadly tunable DBR fibre laser using sampled fibre Bragg gratings [J]. *Electronics Letters*, 1995, 31(1): 37-38.
- [65] Xu S H, Yang Z M, Zhang W N, et al. 400 mW ultrashort cavity low-noise single-frequency Yb<sup>3+</sup>-doped phosphate fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3708-3710.
- [66] Zhu X, W. S, Zong J, et al. 976 nm single-frequency distributed Bragg reflector fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(20): 4167.
- [67] Yang C, Zhao Q, Feng Z, et al. 1120 nm kHz-linewidth single-polarization single-frequency Yb-doped phosphate fiber laser [J]. *Optics Express*, 2016, 24(26): 29794.
- [68] Hou Y, Qian Z, Pu W. Frequency- and intensity-noise suppression in Yb<sup>3+</sup>-doped single-frequency fiber laser by a passive optical-feedback loop [J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 12991.
- [69] Wang Y, Wu J, Zhao Q, et al. Single-frequency DBR Nd-doped fiber laser at 1120 nm with a narrow linewidth and low threshold [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(8): 2263-2266.
- [70] Fu S, Zhu X, Zong J, et al. Single-frequency Nd<sup>3+</sup>-doped phosphate fiber laser at 915 nm [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(6): 1808-1813.
- [71] Fu S, Zhu X, Zong J, et al. Diode-pumped 1.15 W linearly polarized single-frequency Yb<sup>3+</sup>-doped phosphate fiber laser [J]. *Optics Express*, 2021, 29(19): 30637-30643.
- [72] Tao Y, Zhang S, Jiang M, et al. High power and high efficiency

- single-frequency 1030 nm DFB fiber laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 145: 107519.
- [73] Zhu X, Zong J, Miller A, et al. Single-frequency Ho<sup>3+</sup>-doped ZBLAN fiber laser at 1200 nm [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(20): 4185-4187.
- [74] Zhang W, Li C, Mo S, et al. A compact low noise single frequency linearly polarized DBR fiber laser at 1550 nm [J]. *Chinese Physics Letters*, 2012, 29(8): 084205.
- [75] Hofmann P, Voigtlander C, Nolte S, et al. 550-mW output power from a narrow linewidth all-phosphate fiber laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(5): 756-760.
- [76] Yang C, Guan X, Lin W, et al. Efficient 1.6  $\mu\text{m}$  linearly-polarized single-frequency phosphate glass fiber laser [J]. *Optics Express*, 2017, 25(23): 29078-29085.
- [77] Hou Y, Zhang Q, Qi S, et al. 1.5  $\mu\text{m}$  polarization-maintaining dual-wavelength single-frequency distributed Bragg reflection fiber laser with 28 GHz stable frequency difference [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1383-1386.
- [78] Jiang M, Zhou P, Gu X. Ultralong  $\pi$ -phase shift fiber Bragg grating empowered single-longitudinal mode DFB phosphate fiber laser with low-threshold and high-efficiency [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 13131-13136.
- [79] Wen Q, Sun Z, Gan Y, et al. Sub-kilohertz linewidth fiber laser by using Bragg grating filters [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(15): 4299-4304.
- [80] Cen X, Guan X, Yang C, et al. Short-wavelength, in-band-pumped single-frequency DBR Tm<sup>3+</sup>-doped germanate fiber laser at 1.7  $\mu\text{m}$  [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 33(7): 350-353.
- [81] Morkel P R, Cowle G J, Payne D N. Traveling-wave erbium fiber ring laser with 60 kHz linewidth [J]. *Electronics Letters*, 1990, 26: 632-634.
- [82] Jhon Y M, Kim M W, Kim B K, et al. Single-frequency and single-polarization Er<sup>3+</sup>-doped fiber ring laser with less than 0.7 kHz linewidth [C]//Conference on Lasers & Electro-optics, 1999.
- [83] Suzuki A, Takahashi Y, Yoshida M, et al. An ultralow noise and narrow linewidth  $\lambda/4$ -shifted DFB Er-doped fiber laser with a ring cavity configuration [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(19): 1463-1465.
- [84] He X, Xu S, Li C, et al. 1.95  $\mu\text{m}$  kHz-linewidth single-frequency fiber laser using self-developed heavily Tm<sup>3+</sup>-doped germanate glass fiber [J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 20800.
- [85] Poozesh R, Madanipour K, Parvin P. High SNR watt-level single frequency Yb-doped fiber laser based on a saturable absorber filter in a cladding-pumped ring cavity [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36: 4880-4886.
- [86] Wang K, Wen Z, Chen H, et al. Single-frequency all-polarization-maintaining ytterbium-doped bidirectional fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2020, 46(2): 404-407.
- [87] Lu B, Kang J, Qi X, et al. High-stability broadband wavelength-tunable single-frequency ytterbium-doped all-fiber compound ring cavity [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(2): 1-8.
- [88] Yang C, Xia L, Wang Y, et al. Wavelength tunable single longitudinal mode fiber laser pinned to 25 GHz spacing [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2014, 56(10): 2404-2406.
- [89] Li S Y, Ngo N Q, Zhang Z R. Tunable fiber laser with ultra-narrow linewidth using a tunable phase-shifted chirped fiber grating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(17): 1482-1484.
- [90] Lu J, Chen S, Bai Y. Study on single-mode compound-ring fiber laser [J]. *Optical Technology*, 2005, 31(2): 212-213. (in Chinese)
- [91] Barnsley P, Urquhart P, Millar C, et al. Fiber Fox-Smith resonators: Application to single-longitudinal-mode operation of fiber lasers [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1988, 5(8): 1339-1346.
- [92] Pang H W, Feng Y, Xing L F. Study on linear multi-cavities erbium-doped fiber laser [J]. *Optoelectronic Technique & Information*, 2003, 16(6): 24-26. (in Chinese)
- [93] Xu O, Lu S, Feng S, et al. Single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser with the fiber-Bragg-grating-based asymmetric two-cavity structure [J]. *Optics Communications*, 2009, 282(5): 962-965.
- [94] Feng T, Yan F P, Li Q, et al. Stable single longitudinal mode erbium-doped silica fiber laser based on an asymmetric linear three-cavity structure [J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(1): 014208.
- [95] Zhao Y, Chang J, Wang Q, et al. Research on a novel composite structure Er-doped DBR fiber laser with a  $\pi$ -phase shifted FBG [J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22515-22522.
- [96] Zhang J, Yue C Y, Schinn G W, et al. Stable single-mode compound-ring erbium-doped fiber laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1996, 14(1): 104-109.
- [97] Zhang X, Chen W, Liu Y, et al. Single longitudinal mode fiber laser with multiple ring cavities and its frequency stabilization [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(1): 50-54. (in

- Chinese)
- [98] Tian Y, Feng S, Ma Y, et al. A wide-tunable single-longitudinal-mode fiber laser based on compound ring cavity and tunable fiber Bragg grating [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2013, 30(3): 288-292. (in Chinese)
- [99] Feng T, Ding D, Zhao Z, et al. Switchable 10 nm-spaced dual-wavelength SLM fiber laser with sub-kHz linewidth and high OSNR using a novel multiple-ring configuration [J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(10): 105104.
- [100] Wang Z, Shang J, Mu K, et al. Stable single-longitudinal-mode fiber laser with ultra-narrow linewidth based on convex-shaped fiber ring and Sagnac loop [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 166398-166403.
- [101] Liu H, Lu Q, Wei S, et al. Long-term stable 850-Hz linewidth single-longitudinal-mode ring cavity fiber laser using polarization-maintaining fiber [J]. *Applied Physics B*, 2020, 126(6): 1-7.
- [102] Liu H, Zhang J, Wei S, et al. Low-noise compound ring cavity fiber laser with stable single-longitudinal-mode operation [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(5): 0501017. (in Chinese)
- [103] Ding J, Chen H, Bai J. Research of tunable single-frequency fiber laser based on fiber ring filter [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 366-371. (in Chinese)
- [104] Zhang L, Zhang J, Sheng Q, et al. Watt-level 1.7- $\mu\text{m}$  single-frequency thulium-doped fiber oscillator [J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 27048-27056.
- [105] Feng T, Yan F, Peng W, et al. A high stability wavelength-tunable narrow-linewidth and single-polarization erbium-doped fiber laser using a compound-cavity structure [J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(4): 045101.
- [106] Feng T, Yan F, Liu S, et al. Switchable and tunable dual-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber laser with special subring-cavity and superimposed fiber Bragg gratings [J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(12): 125106.
- [107] Feng T, Yan F, Liu S, et al. A switchable and wavelength-spacing tunable single-frequency and single-polarization dual-wavelength erbium-doped fiber laser based on a compound-cavity structure [J]. *Laser Physics*, 2014, 24(8): 085101.
- [108] Park N, Dawson J W, Vahala K J, et al. All fiber, low threshold, widely tunable single-frequency, erbium-doped fiber ring laser with a tandem fiber Fabry-Perot filter [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 59(19): 2369-2371.
- [109] Polynkin A, Polynkin P, Mansuripur M, et al. Single-frequency fiber ring laser with 1 W output power at 1.5  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Express*, 2005, 13(8): 3179-3184.
- [110] Cheng X P, Shum P, Tse C H, et al. Single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser based on high finesse fiber Bragg grating Fabry-PÉrot etalon [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(12): 976-978.
- [111] Das G, Chaboyer Z J. Single-wavelength fiber laser with 250 mW output power at 1.57  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 7750-7755.
- [112] Bai Y, Yan F, Feng T, et al. Ultra-narrow-linewidth fiber laser in 2  $\mu\text{m}$  band using saturable absorber based on PM-TDF [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0101003. (in Chinese)
- [113] Wu B, Liu Y, Zhang Q, et al. High efficient narrow linewidth fiber laser based on fiber grating Fabry-Perot cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(3): 350-353. (in Chinese)
- [114] Wu B, Liu Y, Liu S, et al. 1550 nm high efficient narrow linewidth fiber laser [J]. *Journal of Optoelectronics-Laser*, 2007, 18(7): 770-772. (in Chinese)
- [115] Mo S, Huang X, Xu S, et al. Compact slow-light single-frequency fiber laser at 1550 nm [J]. *Applied Physics Express*, 2015, 8(8): 82703.
- [116] Horowitz M, Daisy R. Narrow-linewidth, singlemode erbium-doped fibre laser with intracavity wave mixing in saturable absorber [J]. *Electronics Letters*, 1994, 30(8): 648-649.
- [117] Yu L, Qian J, Luo J, et al. Stable single-frequency fiber ring laser with linewidth less than 0.5 kHz [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(04): 345-348. (in Chinese)
- [118] Song Y W, Havstad S A, Starodubov D, et al. 40-nm-wide tunable fiber ring laser with single-mode operation using a highly stretchable FBG [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(11): 1167-1169.
- [119] Chen S, Li W, Zhang M, et al. Optical fiber laser with 30 Hz line-width single mode output [J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2006, 26(8): 67-70. (in Chinese)
- [120] Zhang M, Chen S, Fu L, et al. A study of line-width compression for an er-doped optical fiber laser [J]. *Transaction of Beijing Institute of Technology*, 2008, 28(10): 894-897. (in Chinese)
- [121] Chen J, Zhao Y, Zhu Y, et al. Narrow line-width ytterbium-doped fiber ring laser based on saturated absorber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(5): 439-441.
- [122] Xie Z, Shi C, Sheng Q, et al. A single-frequency 1064-nm Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser tandem-pumped at 1018 nm [J]. *Optics Communications*, 2020, 461: 125262.
- [123] Zhang J, Sheng Q, Zhang L, et al. Single-frequency 1.7- $\mu\text{m}$  Tm-doped fiber laser with optical bistability of both power and longitudinal mode behavior [J]. *Optics Express*, 2021, 29(14):

- 21409-21417.
- [124] Zhou M, Stewart G, Whitenett G. Stable single-mode operation of a narrow-linewidth, linearly polarized, erbium-fiber ring laser using a saturable absorber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(5): 2179-2183.
- [125] Ou P, Jia Y, Cao B, et al. Narrow-linewidth single-polarization frequency-modulated Er-doped fiber ring laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(11): 845-847.
- [126] Dai Z, Li J, Zhang X, et al. Stable single-longitudinal-mode fiber laser using PM FBG F-P etalon and PM fiber saturable absorber [J]. *Optical & Quantum Electronics*, 2010, 41(14-15): 1033-1040.
- [127] Xu P, Hu Z, Ma M, et al. Mapping the optical frequency stability of the single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring lasers with saturable absorber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 49: 337-342.
- [128] Yin T, Song Y, Jiang X, et al. 400 mW narrow linewidth single-frequency fiber ring cavity laser in 2  $\mu\text{m}$  waveband [J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 15794-15799.
- [129] Qi Z, Yin T, Jiang X, et al. Narrow-linewidth high-efficiency single-frequency ytterbium-doped fiber laser with highly linear polarization at 1064 nm [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(10): 2833-2838.
- [130] Wei F, Yang X, Tong Z, et al. Dual-wavelength narrow-linewidth fiber laser based on F-P fiber ring filter [J]. *Optik*, 2011, 123(11): 1026-1029.
- [131] Fang X, Tong Z, Cao Y, et al. Narrow linewidth ring cavity fiber laser using F-P fiber ring filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 329-333. (in Chinese)
- [132] Havstad S A. Loop-mirror filters based on saturable-gain or absorber gratings [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(21): 1466-1468.
- [133] Huang S, Feng Y, Dong J, et al. 1083 nm single frequency ytterbium doped fiber laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2005, 2(10): 498-501.
- [134] Sun G, Zhou Y, Hu Y, et al. Switchable erbium-doped fiber ring laser based on Sagnac loop mirror incorporating few-mode high birefringence fiber [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(6): 1608-1611.
- [135] Yin M, Huang S, Lu B, et al. Slope efficiency over 30% single-frequency ytterbium-doped fiber laser based on Sagnac loop mirror filter [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(27): 6799-6803.
- [136] Yeh C H, Huang T J, Yang Z Q, et al. Stable single-longitudinal-mode erbium fiber ring laser utilizing self-injection and saturable absorber [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(6): 1-6.
- [137] Shi C, Fu S, Shi G, et al. All-fiberized single-frequency silica fiber laser operating above 2  $\mu\text{m}$  based on SMS fiber devices [J]. *Optik*, 2019, 187: 291-296.
- [138] Zhou J, Luo A, Luo Z, et al. Dual-wavelength single-frequency fiber laser based on graphene saturable absorber [C]//ASIA Communications and Photonics Conference, 2014.
- [139] Chen S, Wang Q, Zhao C, et al. Stable single-longitudinal-mode fiber ring laser using topological insulator-based saturable absorber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(22): 3836-3842.
- [140] Deng J, Chen H, Lu B, et al. Single frequency Yb-doped fiber laser based on graphene loop mirror filter [J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(2): 025802.
- [141] Lu B, Yuan L, Qi X, et al. MoS<sub>2</sub> saturable absorber for single frequency oscillation of highly Yb-doped fiber laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(7): 071404.
- [142] Sun Z, Jiang X, Wen Q, et al. Single frequency fiber laser based on an ultrathin metal-organic framework [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(16): 4662-4666.
- [143] Sabert H, Ulrich R. Gain stabilization in a narrow-band optical filter [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(16): 1161-1163.
- [144] Takushima Y, Yamashita S. Single-frequency and polarization-stable oscillation of Fabry-Perot fiber laser using a nonpolarization-maintaining fiber and an intracavity etalon [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(11): 1468-1470.
- [145] Guo Y, Wang D, Liu F, et al. A novel single-mode, linearly polarized, erbium-doped fiber laser with a stabilized frequency [C]//Second International Conference on Electric Technology & Civil Engineering, 2013.
- [146] Chang D I, Guy M J. Single-frequency erbium fibre laser using the twisted-mode technique [J]. *Electronics Letters*, 1996, 32(19): 1786-1787.
- [147] Mo S, Li Z, Huang X, et al. 820 Hz linewidth short-linear-cavity single-frequency fiber laser at 1.5  $\mu\text{m}$  [J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(3): 035101.
- [148] Mo S, Huang X, Xu S, et al. 600-Hz linewidth short-linear-cavity fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(20): 5818-5821.
- [149] Siegman A E, Evtuhov V. A "Twisted-Mode" technique for obtaining axially uniform energy density in a laser cavity [J]. *Applied Optics*, 1965, 4(1): 142-143.
- [150] Shevy Y, Shevy D, Lee R, et al. Slow light laser oscillator [C]//Optical Fiber Communication Conference, 2010.
- [151] Yuan L M, Lu J B, Kang J, et al. Narrow-linewidth Single-frequency Ytterbium-doped Fiber Laser at 1083 nm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(8): 0814003.

- [152] Liu Z, Zhou P, Xu X, et al. Coherent Beam Combining of High Average Power Fiber Lasers [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016. (in Chinese)
- [153] Nikles M, Thevenaz L. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers [J]. *Lightwave Technology Journal of*, 1997, 15(10): 1842-1851.
- [154] Smith S P, Zarinetchi F, Ezekiel S. Narrow-linewidth stimulated Brillouin fiber laser and applications [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(6): 393-395.
- [155] Cowle G J, Stepanov D Y. Hybrid Brillouin/erbium fiber laser [J]. *Optics Letters*, 1996, 21(16): 1250-1252.
- [156] Chen W, Zhang Y, Ren M, et al. Experimental study of single-longitudinal-mode Brillouin erbium-doped fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 29(9): 1740-1744. (in Chinese)
- [157] Liu Y, Yu J, Wang W, et al. Narrow Linewidth Single Longitudinal Mode Brillouin Fiber Laser Based on Feedback Fiber Loop [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 168-172. (in Chinese)
- [158] 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.
- [159] Zhou H, Chen M, Chen W, et al. Brillouin-erbium fiber laser with ultra-short ring cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(7): 0702010. (in Chinese)
- [160] Mo C, Zhou M, Zhang Y, et al. Ultranarrow-linewidth Brillouin/erbium fiber laser based on 45-cm erbium-doped fiber [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(1): 1-6.
- [161] Zhonghua O, Xiaoyi B, Yang L, et al. Ultranarrow Linewidth Brillouin Fiber Laser [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2014, 26(20): 2058-2061.
- [162] Yi L, Zhang M, Zhang J, et al. Single-longitudinal-mode triple-ring Brillouin fiber laser with a saturable absorber ring resonator [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(9): 1744-1749.
- [163] Mo C, Chenyu W, Jianfei W, 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.
- [164] Mo C, Chenyu W, Jianfei W, et al. Ultra-narrow-linewidth Brillouin/Erbium Fiber Laser [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 7(1): 1-6.
- [165] Li Y, Wang C, Qi H, et al. An ultra-narrow linewidth Brillouin fiber laser based on distributed feedback fiber laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(7): 0702010. (in Chinese)
- [166] Zhou Z, Chen L, Bao X. Mode characteristic manipulation of random feedback interferometers in Brillouin random fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(3): 678-681.
- [167] Zhu T, Bao X, Chen L, et al. Experimental study on stimulated Rayleigh scattering in optical fibers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(22): 22958-22963.
- [168] Zhu T, Bao X, Chen L. A single longitudinal-mode tunable fiber ring laser based on stimulated Rayleigh scattering in a nonuniform optical fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(12): 1802-1807.
- [169] Yin G, Saxena B, Bao X. Tunable Er-doped fiber ring laser with single longitudinal mode operation based on Rayleigh backscattering in single mode fiber [J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 25981-25989.
- [170] Zhu T, Chen F Y, Huang S H, et al. An ultra-narrow linewidth fiber laser based on Rayleigh backscattering in a tapered optical fiber [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(5): 055110.
- [171] Zhu T, Huang S, Shi L, et al. Rayleigh backscattering: A method to highly compress laser linewidth [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59(33): 4631-4636.
- [172] Zhu T, Shi L, Huang S. Ultra-narrow linewidth fiber laser with self-injection feedback based on Rayleigh backscattering [C]//CLEO: Science and Innovations, 2014.
- [173] Zhu T, Zhang B, Shi L, et al. Tunable dual-wavelength fiber laser with ultra-narrow linewidth based on Rayleigh backscattering [J]. *Optics Express*, 2016, 24(2): 1324-1330.
- [174] Gu J, Yang Y, Liu M, et al. A switchable and stable single-longitudinal-mode, dual-wavelength erbium-doped fiber laser assisted by Rayleigh backscattering in tapered fiber [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 5(10): 1039-1040.
- [175] Cui J, Dang H, Feng K, et al. Stimulated Brillouin scattering evolution and suppression in an integrated stimulated thermal Rayleigh scattering-based fiber laser [J]. *Photonics Research*, 2017, 5(3): 233-238.
- [176] Li Y, Huang L, Gao L, et al. Optically controlled tunable ultra-narrow linewidth fiber laser with Rayleigh backscattering and saturable absorption ring [J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 26896-26906.
- [177] Iroegbu P I, Liu M, Lan T, et al. 1310 nm Narrow Linewidth Laser Assisted by the Feedback of Double-FBGs [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(5): 1-12.
- [178] Pang M, Bao X, Chen L. Observation of narrow linewidth spikes in the coherent Brillouin random fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1866-1868.
- [179] Huang S, Zhu T, Yin G, et al. Tens of hertz narrow-linewidth



- laser based on stimulated Brillouin and Rayleigh scattering [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5286-5289.
- [180] Lai W, Ma P, Xiao H, et al. High-power narrow-linewidth fiber laser technology [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(12): 7-28. (in Chinese)
- [181] Xiao H, Zhou P, Wang X, et al. Experimental investigation on 1018-nm high-power ytterbium-doped fiber amplifier [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(13): 1088-1090.
- [182] Loh W H, Samson B N, Dong L, et al. High performance single frequency fiber grating-based erbium/ytterbium [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(1): 114-118.
- [183] Koo K P, Kersey A D, Dandridge A, et al. Measurement of the thermal-noise-limited frequency stability of a fiber-optic Bragg-grating laser [C]//Optical Fiber Communications Conference, 1995.
- [184] Ronnekleiv E. Frequency and intensity noise of single frequency fiber Bragg grating lasers [J]. *Optical Fiber Technology*, 2001, 7(3): 206-235.
- [185] Li L, Morrell M, Qiu T, et al. Short cladding-pumped Er/Yb phosphate fiber laser with 1.5 W output power [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(14): 2721-2723.
- [186] Qiu T, Suzuki S, Schülzgen A, et al. Generation of watt-level single-longitudinal-mode output from cladding-pumped short fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(20): 2748-2750.
- [187] Polynkin P, Polynkin A, Mansuripur M, et al. Single-frequency laser oscillator with watts-level output power at 1.5  $\mu\text{m}$  by use of a twisted-mode technique [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(20): 2745-2747.
- [188] Slimen F B, Chen S, Lousteau J, et al. Highly efficient  $\text{Tm}^{3+}$  doped germanate large mode area single mode fiber laser [J]. *Optical Materials Express*, 2019, 9(10): 4115-4125.
- [189] Limpert J, Schreiber T, Nolte S, et al. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser [J]. *Optics Express*, 2003, 11(7): 818-823.
- [190] Li L, Schülzgen A, Temyanko V L, et al. Short-length microstructured phosphate glass fiber lasers with large mode areas [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(10): 1141-1143.
- [191] Li L, Schülzgen A, Temyanko V L, et al. Ultracompact cladding-pumped 35-mm-short fiber laser with 4.7-W single-mode output power [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(16): 161106.
- [192] Schülzgen A, Li L, Temyanko V L, et al. Single-frequency fiber oscillator with watt-level output power using photonic crystal phosphate glass fiber [J]. *Optics Express*, 2006, 14(16): 7087-7092.
- [193] Mohammed W S, Smith P, Gu X. All-fiber multimode interference bandpass filter [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(17): 2547.
- [194] Zhou J, He B, Feng Y, et al. High efficiency single-mode-multimode-single-mode fiber laser with diffraction-limited beam output [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(24): 5554-5558.
- [195] Belke S, Becker F, Neumann B, et al. Completely monolithic linearly polarized high-power fiber laser oscillator [C]//Conference on Fiber Lasers XI -Technology, Systems, and Applications, 2014.
- [196] Shirakawa A, Hiwada K, Hasegawa S, et al. All-fiber linearly-polarized Yb-doped fiber laser yielding 2.2-W green second harmonics [C]//Conference on Lasers & Electro-optics, 2005.
- [197] Jelger P, Wang P, Sahu J K, et al. High-power linearly-polarized operation of a cladding-pumped Yb fibre laser using a volume Bragg grating for wavelength selection [J]. *Optics Express*, 2008, 16(13): 9507-9512.
- [198] Xia, Liu, Songtao, et al. Linearly polarized operation of Yb-doped fiber laser by Brewster's angle-polished fiber end [J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(2): 184-186.
- [199] Shirakawa A, Kamijo M, Ota J, et al. Characteristics of linearly polarized Yb-doped fiber laser in an all-fiber configuration [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(20): 1664-1666.
- [200] Wang J, Hu J, Zhang L, et al. A 100 W all-fiber linearly-polarized Yb-doped single-mode fiber laser at 1120 nm [J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28373-28378.
- [201] Willis C, Mckee E, Böswetter P, et al. Highly polarized all-fiber thulium laser with femtosecond-laser-written fiber Bragg gratings [J]. *Optics Express*, 2013, 21(9): 10467-10474.
- [202] Huang L, Zhang H, Wang X, et al. A high-power LD-pumped linearly polarized Yb-doped fiber laser operating at 1152 nm with 42 GHz narrow linewidth and 18 dB PER [J]. *Laser Physics*, 2016, 26(7): 075105.
- [203] Jiang M, Xu H, Zhou P, et al. All-fiber, narrow linewidth and linearly polarized fiber laser in a single-mode-multimode-single-mode cavity [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(22): 6121-6124.
- [204] Su C, Pu X Y, Wang J H, et al. study on output characteristics of linearly polarized all-fiber Yb-doped fiber laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(S): s102006. (in Chinese)
- [205] Yusheng H, Qirong X, Dan Li Z W, et al. All-fiber linearly polarized laser oscillator by fiber coiling loss control [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(4): 044201.

- [206] Xu Y, Fang Q, Qin Y, et al. 2 kW narrow spectral width monolithic continuous wave in a near-diffraction-limited fiber laser [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(32): 9419-9421.
- [207] Huang Z, Liang X, Li C, et al. Spectral broadening in high-power Yb-doped fiber lasers employing narrow-linewidth multilongitudinal-mode oscillators [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(2): 297-302.
- [208] Jiang M, Ma P, Huang L, et al. kW-level, narrow-linewidth linearly polarized fiber laser with excellent beam quality through compact one-stage amplification scheme [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2017, 5(4): 47-51.
- [209] Yan P, Huang Y, Sun J, et al. 3.1 kW monolithic MOPA configuration fibre laser bidirectionally pumped by non-wavelength-stabilized laser diodes [J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(8): 080001.
- [210] Huang Y, Yan P, Wang Z, et al. 2.19 kW narrow linewidth FBG-based MOPA configuration fiber laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3136-3145.
- [211] Wang Y, Ma Y, Peng W, et al. 2.4 kW, narrow-linewidth, near-diffraction-limited all-fiber laser based on a one-stage master oscillator power amplifier [J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 17(1): 015102.
- [212] Huang Y, Xiao Q, Li D, et al. 3 kW narrow linewidth high spectral density continuous wave fiber laser based on fiber Bragg grating [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 133: 106538.
- [213] Steinke M, Tünnermann H, Kuhn V, et al. Single-frequency fiber amplifiers for next-generation gravitational wave detectors [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 1-13.
- [214] Wellmann F, Steinke M, Meylahn F, et al. High power, single-frequency, monolithic fiber amplifier for the next generation of gravitational wave detectors [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 28523-28533.
- [215] Chen B, Yu Y, Wu C, et al. High efficiency mid-infrared 3.8  $\mu\text{m}$  MgO: PPLN optical parametric oscillator pumped by narrow linewidth 1064 nm fiber laser [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 361-367.
- [216] Rao Y. Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 074207. (in Chinese)
- [217] Shi W, Fang Q, Li J, et al. High-performance fiber lasers for LIDARs [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(8): 0802001. (in Chinese)
- [218] Wang Y, Li T, Qiu Q, et al. Experiments on homodyne coherent optical communication with NPRO as light sources [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1122003. (in Chinese)
- [219] Mihélic F, Bacquet D, Zemmouri J, et al. Ultrahigh resolution spectral analysis based on a Brillouin fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(3): 432-434.
- [220] Yao B, Chen Q, Chen Y, et al. 280 mHz Linewidth DBR Fiber Laser Based on PDH Frequency Stabilization with Ultrastable Cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(5): 0501014. (in Chinese)
- [221] Zhao Q, Zhang Z, Wu B, et al. Noise-sidebands-free and ultra-low-RIN 1.5  $\mu\text{m}$  single-frequency fiber laser towards coherent optical detection [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(4): 326-331.