

高功率单频掺铒光纤激光技术研究进展 (特邀)

程 鑫^{1,2}, 姜华卫¹, 冯 衍^{1,3*}

1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800;
2. 中国科学院大学材料科学与光电工程中心, 北京 100049;
3. 国科大杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024)

摘要: 近年来,在相干探测、激光雷达、激光冷却以及引力波探测等领域应用需求的驱动下,窄线宽、低噪声的高功率单频掺铒光纤激光技术成为国内外光纤激光技术领域的研究热点。简要介绍了近些年高功率单频掺铒光纤激光技术的研究进展,包括单频掺铒光纤激光器和高功率单频掺铒光纤放大器,分析了高功率单频掺铒光纤激光的发展趋势和面临的挑战,并对下一步的发展方向进行了展望。

关键词: 光纤激光; 单纵模; 掺铒光纤激光器; 单频光纤放大器

中图分类号: TN248 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220127

Research progress of high-power single-frequency erbium-doped fiber laser technology (*Invited*)

Cheng Xin^{1,2}, Jiang Huawei¹, Feng Yan^{1,3*}

1. Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;
2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China)

Abstract: In recent years, high-power single-frequency (SF) erbium-doped fiber lasers with narrow linewidth and low noise have been intensively studied, driven by application requirements in the fields of coherent detection, lidar, laser cooling and gravitational wave detection. The research progresses of high-power SF erbium-doped fiber lasers were reviewed in this paper, including SF erbium-doped fiber lasers and high-power SF erbium-doped fiber amplifiers. The development trend and challenges of the high-power SF erbium-doped fiber lasers were analyzed, and the next development direction was prospected.

Key words: fiber laser; single longitudinal mode; Er-doped fiber laser; single-frequency fiber amplifier

收稿日期:2022-02-24; 修订日期:2022-04-12

基金项目:国家重点研发计划(2020YFB1805900, 2020YFB0408300)

作者简介:程鑫,男,博士生,主要从事单频光纤放大器技术方面的研究。

导师(通讯作者)简介:冯衍,男,研究员,博士,主要从事精密激光技术与非线性光学方面的研究。

0 引言

掺铒光纤激光由于波长位于大气透射窗口和人眼安全波段而具有极高的研究意义和应用潜力,一直是激光技术的研究热点^[1]。近些年,得益于光纤集成器件工艺的成熟,高功率掺铒光纤激光获得迅猛发展,当前在基础研究、光纤通信和医疗等领域发挥着重要应用。与此同时,单频光纤激光,即运行在单纵模下的激光,因具有窄线宽、低噪声等优异性能在相干光通信、激光雷达、光谱合成、激光冷却、原子捕获和引力波探测等领域有着非常广阔的应用前景。

单频光纤激光器的实现方式有两大类:基于行波腔并结合窄带滤波器的单频激光结构和基于驻波腔的单频激光结构。前者腔长较长,结构复杂且容易出现跳模现象;相对而言,后者腔长短,结构简单,模式稳定,但腔长严格限制了增益光纤长度,往往需要铒离子高掺杂浓度光纤作为增益介质。但是单掺铒光纤中离子团簇严重影响其掺杂浓度^[2],往往采用多组分光纤来提高铒离子掺杂浓度。基于此方案的单频掺铒光纤激光器虽然已经获得了数百毫瓦的功率输出,但尚不满足某些领域的应用,功率的进一步提升需要采用主振荡功率放大(MOPA)方案。

在高功率单频光纤放大器方面,受激布里渊散射(SBS)是限制功率提升的主要因素,通常采用增大光纤纤芯模场面积、缩短光纤长度、对光纤施加梯度温度或应力等方式提高其阈值。与其他单掺杂光纤有所不同的是,掺铒光纤中通常采用镱离子共掺方式提高铒离子的掺杂浓度并增加泵浦吸收系数。在铒镱共掺光纤放大器(EYDFA)中,1 μm波段的放大自发辐射(ASE)是限制功率进一步增加的另一重要因素。针对此问题,已发展出众多方法,例如非峰值(off-peak)泵浦、共种子(co-seeding)泵浦以及同带(in-band)泵浦等。

近年来,随着光纤激光技术的发展完善,单频掺铒光纤激光技术在高功率、窄线宽以及波长拓展等方面取得了重大进展。文中首先从行波腔和驻波腔两种腔型介绍了单频掺铒光纤激光器的发展现状;然后分别介绍了脉冲和连续两种不同工作模式下高功率单频掺铒光纤放大器的研究进展,分析了高功率单频掺铒光纤激光的发展趋势和面临的挑战;最后对该方

向的进展进行了总结,并对单频掺铒光纤激光技术下一步的发展方向做了展望。

1 单频掺铒光纤激光器

产生单频激光的关键技术是建立一个单纵模运转的激光谐振腔,根据运行方式可分为行波腔和驻波腔。

1.1 行波腔结构

行波腔,采用较长的腔体,通过窄带滤波装置实现单纵模运转,典型装置如图1所示^[3]。采用额外的非泵浦掺铒光纤作为可饱和吸收体,当激光在此段光纤中干涉时引起驻波饱和效应,形成瞬态带通光栅滤波器,从而保证了稳定的单频激光运转。行波腔中无源可调谐滤波器可以提供粗波长选择,调谐范围比较宽。表1列出了基于行波腔结构的单频掺铒光纤激光器研究成果^[4-15]。

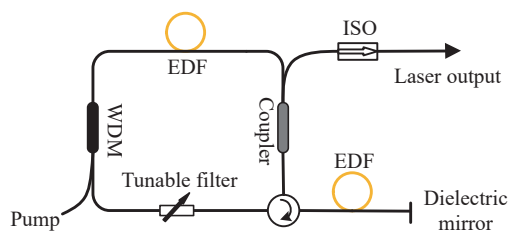


图 1 典型行波腔掺铒光纤激光器的原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of a typical traveling wave cavity erbium-doped fiber laser

1990年,英国南安普顿大学的Morkel等在环形腔中通过控制激光单向运转消除空间烧孔效应,首次实现了掺铒光纤的单频1555 nm激光输出^[4]。输出功率为1 mW、线宽小于60 kHz。1991年,美国Telcordia Technologies的Smith等报导了在腔内插入声光滤波器实现了高达40 nm范围连续可调的单频掺铒光纤激光输出,中心波长在1545 nm,输出功率2 mW,激光线宽为10 kHz^[6]。由于行波腔对温度漂移和其他外界干扰的高灵敏度,激光模式不易稳定。

为改善行波腔掺铒单频激光器的跳模现象,可以通过引入可饱和吸收体来减少模式跳变。1994年,南安普顿大学的Cheng等人首次采用未泵浦的掺铒光纤作为可饱和吸收体实现稳定无跳模的单频掺铒光纤激光输出,中心波长为1535 nm,线宽为0.95 kHz,

表 1 行波腔单频掺铒光纤激光器研究进展

Tab.1 Research progress of single-frequency erbium-doped fiber lasers with traveling-wave cavity

Structure	Fiber type	Year	Institution	Wavelength/nm	Power/mW	Linewidth/kHz	Ref.
Traveling-wave cavity	Phosphor-alumino-silicate fiber	1990	University of Southampton	1555	1	<60	[4]
	Silica fiber	1990	NTT Transmission Systems Laboratories	1549.3-1552.1	1.3	<1.4	[5]
	Silica fiber	1991	Telcordia Technologies	1525-1565	2	10	[6]
	Silica fiber	1991	Alcatel-Lucent	1528-1572	0.32	10	[7]
	Silica fiber	1991	AT&T Bell Laboratories	1530-1575	3	<5.5	[8]
	Silica fiber	1994	University of Southampton	1535	6.2	<0.95	[9]
	Silica fiber	2001	University of Southern California	1522-1562	10	0.75	[10]
	Silica fiber	2003	EXFO Electro-Optical Engineering	1510-1580	0.5	-	[11]
	Silica fiber	2005	National Chiao Tung University	1482-1512	1.3	-	[12]
	Silica fiber	2005	National Chiao Tung University	1480.6-1522.9	10	-	[13]
	Phosphate fiber	2005	University of Arizona	1535	1000	-	[14]
	Silica fiber	2008	Shanghai Jiao Tong University	1565	867	-	[15]

输出功率 6.2 mW [9]。

此前的大部分报道都集中在 C 波段和部分 L 波段,而发展 S 波段的单频掺铒激光对于拓宽通信通道具有重要意义。2005 年, National Chiao Tung University 的 Chien 等人首次报导了 S 波段单频掺铒光纤环形腔激光器,可调谐范围覆盖 1482~1512 nm,输出功率在 1.3 mW [12]。同年该组人员将此波段单频掺铒光纤环形腔激光器输出功率提升到 10 mW [13]。

此外还可以采用复合腔结构改善激光模式。复合腔激光器是由两个或者多个子腔组成,只允许一个满足所有子腔共振条件的激光纵模运转。为了实现这一目的,必须使各子腔之间不对称,即采用不同的腔长配置,从而延长激光的有效自由光谱范围,在过去的 10 多年里,有很多关于这一主题的报道 [16-23]。

但是受光纤中铒离子低掺杂浓度的制约,直接从环形腔输出的单频激光功率较低。直到 2005 年,美国亚利桑那大学的 Polynkin 等利用高掺铒磷酸盐光纤作为增益介质将环形腔单频激光器输出功率突破瓦量级,实现了 700 mW 输出功率下完全无跳模,但更高功率下仍有跳模发生 [14]。2008 年,上海交通大学 Yang 等人在环形腔内加入放大结构获得了输出功率高达 867 mW 的单频激光 [15],这也是国内首次报导如此高功率的单频掺铒光纤激光器。

1.2 驻波腔结构

根据结构区别,驻波腔分为分布反馈式 (DFB) 和

分布布拉格反射式 (DBR) 两种腔型。

DFB 结构是将光纤布拉格光栅 (FBG) 直接写入有源光纤中,在光栅区域的中间引入相位变化,如图 2 所示 [3]。该结构可以作为一个超窄光谱滤波器来实现单频运转。然而,一方面由于腔长较短,另一方面在高泵浦功率下,相移光纤光栅腔内存在着严重的热效应,导致光栅折射率发生变化,进而导致光栅失相,致使单频 DFB 光纤激光器输出功率有限。

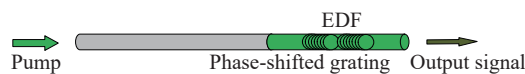


图 2 掺铒 DFB 光纤激光结构示意图 [3]

Fig.2 Structure diagram of erbium-doped DFB fiber laser [3]

图 3 显示了 DBR 单频光纤激光器的典型结构 [3],该激光腔由一对窄带 FBG 与一段掺铒光纤组合而成,具有结构简单、紧凑等优点。对于单频运转工作,掺铒光纤的长度通常限制在几厘米,同样要求光纤具有较高的增益系数。

近年来,国内华南理工大学、天津大学和国防科技大学多个课题组先后对 DBR 单频光纤激光器的研



图 3 掺铒 DBR 光纤激光结构示意图 [3]

Fig.3 Structure diagram of erbium-doped DBR fiber laser [3]

究进展作了综述性报道^[24-27],这里针对驻波腔单频掺铒光纤激光器研究进展作简单说明。表 2 列出了近

年来基于驻波腔结构的单频掺铒光纤激光器的研究成果^[28-39]。

表 2 驻波腔单频掺铒光纤激光器研究进展

Tab.2 Research progress of single-frequency erbium-doped fiber lasers with standing-wave cavity

Structure	Fiber type	Year	Institution	Wavelength/nm	Power/mW	Linewidth/kHz	Ref.
DBR	Silica fiber	1991	United Technologies Research Center	1 548	5	<47	[28]
DBR	Silica fiber	1994	United Technologies Research Center	1 525-1 557	3	-	[29]
DBR	Phosphate fiber	2016	South China University of Technology	1 527-1 563	2.5	<0.7	[30]
DBR	Phosphate fiber	2017	South China University of Technology	1 603	20	1.9	[31]
DBR	Phosphate fiber	2003	NP Photonics	1 535	100	<2	[32]
DBR	Phosphate fiber	2004	NP Photonics	1 560	>200	<2	[33]
DBR	Phosphate fiber	2005	University of Arizona	1 535	1 900	-	[34]
DBR	Phosphate fiber	2005	University of Arizona	1 550	1 600	-	[35]
DFB	Phosphate photonic crystal fiber	2006	University of Arizona	1 534	2 300	-	[36]
DBR	Phosphate fiber	2010	Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS	1 535	100	<5	[37]
DBR	Phosphate fiber	2010	South China University of Technology	1 535	306	1.6	[38]
Linear cavity	Silica fiber	2001	Electronics and Telecommunications Research Institute	1 525-1 565	0.08	<4.6	[39]

第一个 DBR 结构的单频掺铒光纤激光器早在 1991 年被演示^[28],利用掺铒锗铝硅酸盐光纤作为增益介质,但受铒离子浓度制约,激光输出功率只有 5 mW。在波长拓展方面,1994 年,美国 United Technologies Research Center 的 Ball 等人通过对增益光纤施加纵向应力实现了 32 nm 的可调谐单频激光输出,覆盖 1 525~1 557 nm 波长范围^[29]。2017 年,华南理工大学 Yang 等人报道了利用 1.6 cm 铒镱共掺磷酸盐光纤作为增益介质的 DBR 单频激光器,通过优化光栅参数获得了输出功率为 20 mW、线宽为 1.9 kHz 的 1 603 nm 单频激光,这也是首次实现 1 600 nm 以上波长的单频掺铒光纤激光器^[31]。

驻波腔结构单频掺铒光纤激光器的功率提升主要得益于铒镱共掺磷酸盐光纤的发明。2003 年,美国 NP Photonics 公司 Spiegeberg 等基于高浓度铒镱共掺磷酸盐光纤首次报道了百毫瓦功率量级的单频掺铒光纤激光器^[32],工作波长为 1 535 nm,线宽小于 2 kHz,并于次年将单频激光功率提升到 200 mW^[33]。随着共掺双包层磷酸盐光纤和包层泵浦技术的发展,驻波腔单频掺铒光纤激光器输出功率提升到瓦量级^[34-35]。

2 高功率单频掺铒光纤放大器

虽然单频光纤激光器已经获得高达瓦量级的激光输出,但受腔长和热效应的限制,功率的进一步提升必须采用 MOPA 方案。下面分别就脉冲和连续两种不同工作模式介绍高功率单频掺铒光纤放大器的最新研究进展。

2.1 脉冲单频掺铒光纤放大器

脉冲单频掺铒光纤激光在激光测距、光纤传感和相干激光雷达等领域有着不可替代的应用。考虑到单频激光器的单纵模振荡特性,实现脉冲工作的直接方法是周期性地切换腔的损耗,即调 Q 光纤激光器。

早在 2004 年,美国 NP Photonics 公司的 Kaneda 等通过在 DBR 腔内加入压电陶瓷 (PZT) 来产生压致双折射,主动调 Q 实现了峰值功率为 25 W、脉宽 12 ns 的 1 550 nm 脉冲单频激光输出^[40]。2012 年,美国伊利诺伊大学 Zhou 等人报告了一种连续单频激光注入的环形腔主动调 Q 脉冲单频掺铒激光器^[41]。同年,东南大学 Wan 等在参考文献^[42]中进行了类似的工作,通过控制环形腔内增益大小和耦合器的耦合比来实现调 Q,实现了线宽 7 kHz、峰值功率 40 W 的 1 550 nm 纳秒激光。

除了 Q 开关, 还有其他方案可以实现单频掺铒光纤激光在脉冲模式下工作。最简单的方法是利用脉冲光源泵浦单频激光腔。例如, Barmenkov 等在参考文献 [40] 中报道了利用脉冲调制后的泵浦激光器泵浦 DBR 结构的单频掺铒光纤激光器, 实现了线宽约为 500 kHz 的单频脉冲激光输出。此外, 利用外部声光调制器 (AOM) 或电光调制器 (EOM) 直接调制连续波单频激光器的强度也是获得脉冲源的一种方法 [43-44]。但其缺点是外部调制器的传输损耗大, 损伤阈值低, 从而限制了脉冲激光器的峰值功率。

2009 年, 美国 NP Photonics 公司的 Shi 等人利用参考文献 [40] 中相同的方法研制了一种 1538 nm 调 Q DBR 结构的单频掺铒光纤激光器, 输出脉冲宽度为 160 ns, 重复频率为 20 kHz。利用上述 DBR 结构的激光器作为种子源, 采用三级掺铒光纤放大器组成的 MOPA 系统, 实现了单脉冲能量为 54 μJ、峰值功率为 332 W 的单频保偏脉冲激光输出。其中第三级采用 12 cm 长、芯/包层直径为 15/125 μm 的保偏铒镱共掺磷酸盐光纤作为增益介质来抑制放大过程中的 SBS 效应 [45]。并于次年在此结果基础上增加第四级保偏铒镱共掺磷酸盐光纤放大器 (芯/包层直径为 25/400 μm), 在 1530 nm 波长实现了单脉冲能量为 0.126 mJ、峰值功率 1.2 kW 单频脉冲输出, 并指出此放大器可以工作在 C 波段任意波长 [46]。更进一步, 该课题组利用相同结构将 1550 nm 波段脉冲单频光纤激光器峰值功率提高到 128 kW, 3 ns 脉冲下单脉冲能量可达 0.38 mJ [47]。类似的, 2011 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所 Liu 等采用三级 MOPA 结构 (第三级采用 6 m 芯/包层直径为 25/300 μm 大模场铒镱共掺光纤) 放大 AOM 调制的单频脉冲激光, 得到了平均功率为 1.16 W、单脉冲能量为 116 μJ 的全光纤单频 1533 nm 激光脉冲输出 [48]。2018 年, 美国 AdValue Photonics 公司 W. Lee 等人采用纤芯直径为 45 μm 大模场高浓度铒镱共掺硅酸盐光纤作为增益介质, 将 1572 nm 波长处单频脉冲激光的能量提升至 1.8 mJ 的高记录水平 [49]。

虽然大模场光纤能有效提高 SBS 阈值, 但其允许高阶横模的传输, 降低了输出激光光束质量。提高 SBS 阈值的另外一种方法是沿增益光纤施加梯度温度或应力致使 SBS 增益谱产生频移, 使其在增益光纤

中不能得到有效放大。如 2014 年中国科学院上海光学精密机械与物理研究所 Zhang 等在芯径为 10 μm 的保偏铒镱共掺光纤上施加纵向梯度应力将 SBS 阈值提高 3.4 倍, 实现了重频 10 kHz、脉宽 200 ns、峰值功率 361 W 衍射极限的单频 1540 nm 激光输出 [50]。这也是基于 10 μm 纤芯直径的单模窄线宽脉冲光纤激光器的最高峰值功率。

2.2 高功率连续波单频掺铒光纤放大器

对于连续波单频掺铒 MOPA 激光器, 1994 年, 美国 Raytheon Technologies 公司的 Ball 等人基于 1480 nm 激光二极管 (LD) 泵浦单掺铒光纤放大器结构, 首次演示了输出功率为 60 mW 单频掺铒光纤放大器 [51]。随后, 美国 E-TEK Dynamics 公司 Pan 等人利用类似的放大器结构实现了功率为 166 mW 的单频激光输出 [52]。

在掺铒光纤放大器中, 通常采用铒镱共掺光纤作为增益介质, 其中镱离子具有敏化作用, 并有助于提高铒离子的掺杂浓度。镱离子吸收带宽覆盖较大波长范围, 有利于采用成熟的高功率 9xx nm 二极管激光泵浦。图 4 总结了近 20 年来连续单频掺铒光纤放大器功率发展进程的代表性工作 [53-69]。

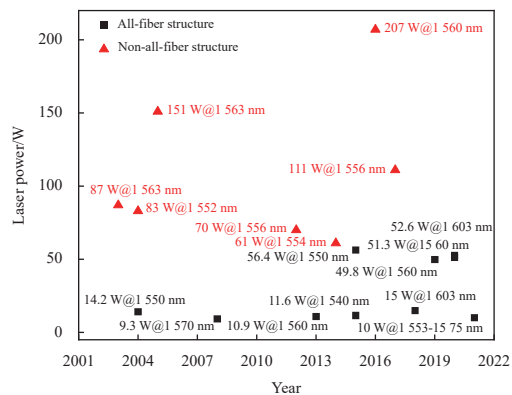


图 4 高功率连续波单频掺铒光纤放大器的功率发展进程

Fig.4 Power development process of high-power continuous-wave single-frequency erbium-doped fiber amplifiers

2003 年, 南安普顿大学 Alam 等采用 915 nm LD 泵浦 100 μm 芯径的 EYDF 报道了第一个瓦量级单频掺铒光纤放大器 [70]。并于同年采用两级放大将单频激光功率提升至 14 W [54]。随后, 同单位 Alegria 等报道了 83 W 连续单频 1552 nm 掺铒光纤放大器 [55]。主放大器采用 3.5 m D 型大模场铒镱共掺磷酸盐光

纤, 975 nm LD 作为泵浦激光。在 250 W 最高泵浦功率下获得了最高 83 W 单频激光输出, 斜率效率约为 34%。激光 M^2 因子为 2.0, 非衍射极限输出特性是由于大芯光纤和单模光纤在熔接点的模场不匹配导致了高阶模产生。60 W 功率下, 输出激光线宽相对 DFB 种子源未展宽。在最高输出功率下, 增益光纤上的高温负载导致涂覆层退化并最终导致了激光器损坏。从 9xx nm 泵浦激光到 1.5 μm 信号光转换带来的巨大量子亏损以热的形式耗散在系统中, 这也是高功率放大器中亟待解决的问题。

2005 年, 南安普顿大学 Jeong 等将连续单频掺铒光纤放大器功率提高到 151 W^[56]。其光路结构如图 5 所示, 1530~1610 nm 可调谐单频种子激光经过一级掺铒光纤放大器输出 1.8 W, 空间耦合进入主放大器。主放大器采用空间耦合的 975 nm LD 反向泵浦 10 m 芯/包直径为 30/650 μm 的 EYDF。利用二向色镜分离 1 μm 的 ASE。该系统在 473 W 泵浦功率下实现了最高 151 W 单频 1563 nm 激光输出, 斜率效率约为 35%, 125 W 1546~1566 nm 范围内可调谐激光输出。虽然大芯径光纤有效提高了 SBS 阈值, 但高功率下后向 1 μm ASE 功率可达 70 W, 这无疑给系统稳定性带来了隐患。

在铒镱共掺光纤放大器中, 镱离子通过交叉弛豫过程向铒离子传递能量。然而, 此方案显著的问题是 1 μm 波段的 ASE(Yb ASE) 及寄生振荡限制了功率的提升。多年来, 研究人员一直在积极寻找有效解决铒镱共掺光纤中 Yb ASE 问题的方法。如使用专门设计的长周期光纤光栅或光子晶体光纤来滤除 Yb ASE, 以及改变泵浦方式, 如 off-peak 泵浦、co-seeding 泵浦

以及 in-band 泵浦等。滤除 Yb ASE 的方法无疑增大了系统的能量损耗, 并且给系统的热耗散带来较大的挑战。下面主要介绍改变泵浦方式来抑制铒镱共掺光纤放大器中 Yb ASE 的方法。

(1) Off-peak 泵浦

此方法是采用偏离 EYDF 吸收峰 (976 nm) 的激光作为泵浦源, 典型的是 915 nm 或 940 nm。较低的吸收截面缓解了镱-铒能量转移的瓶颈问题, 从而显著改善了 Yb ASE 问题。

基于此, 华南理工大学 Yang 等在 2013 年采用 915 nm LD 包层泵浦 EYDF 报道了单级 10.9 W 线偏振单频 1560 nm 全光纤 MOPA 激光器^[58]。2016 年, 美国 Bae Systems 公司 Creeden 等采用 940 nm LD 作为泵浦激光对单频 1560 nm 光纤激光种子源进行放大。其结构如图 6(a) 所示, 主放大级采用 5 m 芯/包直径为 25/300 μm 的 EYDF, 在 410 W 泵浦功率下获得了连续 207 W 的单频 1560 nm 光纤放大器^[61], 斜率效率达 50.5%, 是 9xx nm LD 泵浦铒镱共掺光纤放大器的最高效率, 输出功率随泵浦功率曲线如图 6(b) 所示。输出激光的 M^2 为 1.05。

大模场铒镱共掺光纤在功率提升方面发挥了重要作用, 但对于特殊应用, 例如引力波探测, 需要线偏振基横模输出的单频激光。2007 年, 德国汉诺威激光中心 Omar 等采用与参考文献^[61]相同的结构报道了 100 W 线偏振 TEM₀₀ 模的单频 1556 nm 掺铒光纤放大器^[62]。

考虑到镱离子吸收截面在 10xx nm 波长下更小, 可以进一步缓解了镱-铒能量转移的限制。2018 年, Omar 等首次报道了采用 1018 nm 光纤激光器纤芯泵

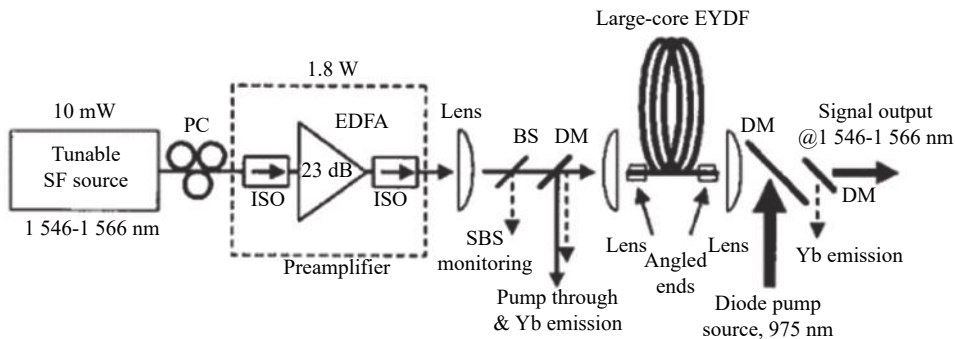


图 5 151 W 连续单频掺铒光纤放大器结构图^[56]

Fig.5 Structure diagram of continuous-wave single-frequency erbium-doped fiber amplifier with 151 W output power^[56]

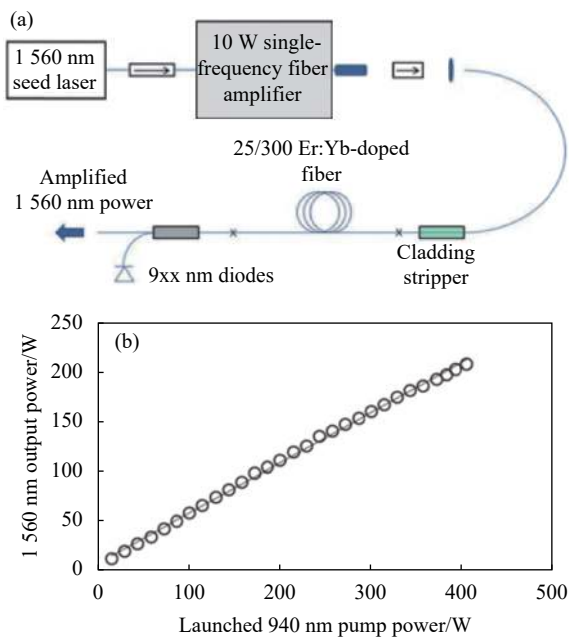


图 6 Off-peak 泵浦方案单频 EYDF 放大器。(a) 结构图; (b) 功率曲线图^[61]

Fig.6 Single-frequency EYDF amplifier with off-peak pumping scheme.

(a) Diagram of structure; (b) Diagram of power curve^[61]

浦的全光纤连续单频铒镱共掺 1556 nm 放大器。采用小于 2 m 长的铒镱共掺光纤获得了超过 11 W 的激光输出,效率超过 48%。此泵浦方式对 Yb ASE 起到

了很好的缓解作用,结合高质量 1018 nm 光纤激光器有望实现更高功率单频掺铒光纤激光输出^[71]。

总体来说, off-peak 泵浦方案需要较长的 EYDF,不利于抑制 SBS; 而且随着泵浦功率的增加, Yb ASE 问题仍然不可避免。

(2) Co-seeding 泵浦

该方式是在泵浦端引入辅助信号光或加入 1 μm FBG 回收铈离子发射带能量。典型的方案是将 1 μm 波段激光与 1.5 μm 波段单频激光共同注入铒镱共掺光纤放大器中,在输出端分光后得到高功率单频 1.5 μm 激光^[72-74]。

2014 年,德国汉诺威激光中心基于此报道了 60 W 单频 1554 nm 大模场铒镱共掺光纤放大器^[59]。其结构图如图 7(a) 所示,采用反向泵浦结构,在泵浦端将 1 μm 的种子激光耦合入 EYDF,泵浦激光采用 976 nm LD。在正向和后向分别测试放大后的 1554 nm 激光和 1 μm 波段激光,输出功率曲线如图 7(b) 所示,在 210 W 的泵浦功率下实现了 61 W 的单频激光输出,其中 TEM₀₀ 模占比高达 90%。同时,1.0 μm 波段激光高达 40 W,斜率效率在 1.5 μm 处约为 30%,在 1.0 μm 处约为 23%。

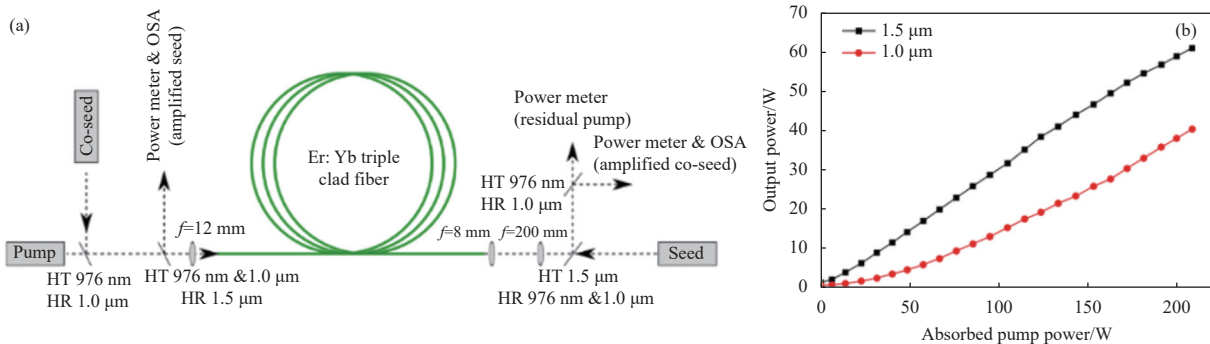


图 7 Co-seeding 泵浦方案单频 EYDF 放大器。(a) 结构图; (b) 功率曲线图^[59]

Fig.7 Single-frequency EYDF amplifier with co-seeding pumping scheme. (a) Diagram of structure; (b) Diagram of power curve^[59]

类似的,采用 EYDF 放大单频 1.6 μm 波段激光时,铒离子波段的 ASE 也会成为限制信号光功率提升的重要因素^[63],1.5 μm 波段激光作为辅助信号显得尤为重要。近年来,华南理工大学的 Guan 等在该波长单频掺铒光纤放大器方面做出了重要贡献^[64]。在 1603 nm 单频掺铒光纤放大器中加入 C 波段闲置光

作为 co-seeding 泵浦,获得了功率高达 52.6 W 线宽为 5.2 kHz 连续激光输出,斜率效率高达 30.4%。

co-seeding 泵浦方式与 off-peak 泵浦面临的问题,需要更长的铒镱共掺光纤,降低了 SBS 阈值。

(3) In-band 泵浦

此泵浦方案是采用波长位于铒离子吸收带的激

光作为泵浦激光,如 1480 nm、1532 nm 光源,避开镱离子的吸收发射过程。由于铟离子对该波长的高吸收可以显著缩短 EYDF 长度从而提高 SBS 阈值;另一方面,较低的量子损耗也降低了散热系统的要求。

早在 2008 年,美国 Army Research Laboratory 的 Dubinski 等首次报道了同带泵浦掺铟光纤单频放大器^[57]。采用 1530 nm LD 包层泵浦 9.5 m 芯/包直径为 20/125 μm 单掺铟光纤,获得了 9.3 W 近衍射极限的单频激光输出,光光转换效率 33%。次年该课题组利用 1476 nm LD 泵浦单掺铟光纤放大单频 1560 nm 激光,将同带泵浦光光转换效率提高到 85%^[75]。

该方法最主要的问题是功率泵浦激光较难获得。但随着拉曼激光技术的发展,1480 nm 拉曼光纤激光器的功率输出突破 300 W^[76]。2015 年,日本

Furukawa Electric 公司 Akira 等利用五阶级联拉曼光纤激光器获得 1480 nm 激光,再泵浦 6 m 单掺铟光纤报道了 11.6 W 6 kHz 单频 1538 nm 光纤放大器^[68]。2019 年,笔者所在的课题组利用掺磷光纤作为拉曼增益光纤,从 1064 nm 两阶级联拉曼得到结构简单紧凑的 1480 nm 拉曼光纤激光器,同带泵浦单频掺铟光纤放大器^[69],光路结构如图 8(a) 所示。单频 1560 nm 种子源采用商用 DFB 光纤激光器,输出功率 40 mW,线宽小于 0.1 kHz。经过预放大器放大至 1.5 W,与 1480 nm 光纤激光耦合到 2.5 m 保偏芯/包直径为 12/125 μm 的 EYDF 中。功率曲线图如图 8(b) 所示,在 60.6 W 的 1480 nm 激光泵浦下获得最高 49.8 W 的连续单频 1560 nm 激光输出,斜率效率高达 79.7%。这也是该芯径 EYDF 报道的最高功率单频激光。

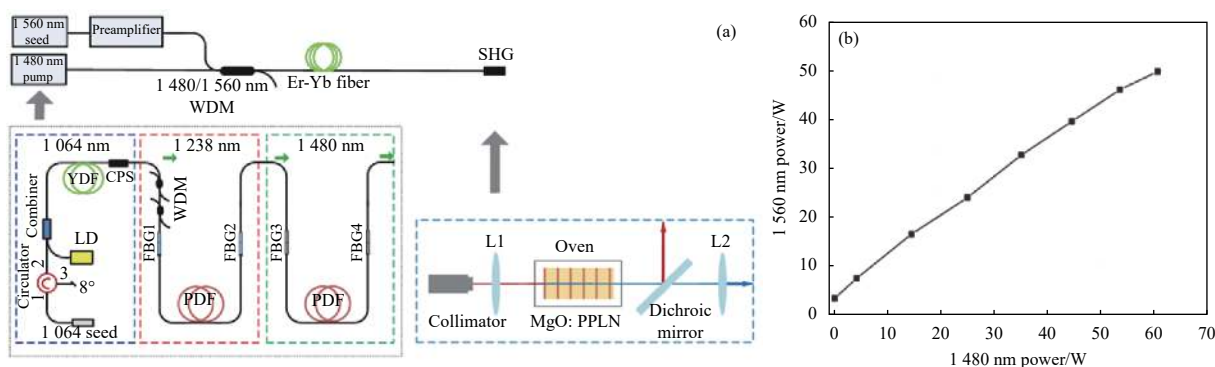


图 8 In-band 泵浦方案单频 EYDF 放大器。(a) 结构图;(b) 功率曲线图^[69]

Fig.8 Single-frequency EYDF amplifier with in-band pumping scheme. (a) Diagram of structure; (b) Diagram of power curve^[69]

3 总结与展望

文中简要介绍了单频掺铟光纤激光技术的研究进展。结合单频激光的产生腔型介绍了单频掺铟光纤激光器的发展历程;根据脉冲和连续两种工作模式分别介绍了高功率单频掺铟光纤放大器的研究进展,详细分析了铟镱共掺光纤高功率放大器中有效改善 Yb ASE 问题的几种方案。

单频掺铟光纤激光技术作为发展最早、应用最广泛的激光技术,经过几十年的发展,虽然已经实现了数百瓦、线宽百赫兹、波长调谐范围为数十纳米的性能,但其发展远不及镱、铥等稀土离子掺杂单频光纤激光器迅速。究其原因主要包括:采用常规 9xx nm 大功率二极管激光泵浦时近 40% 的量子亏损、相对

而言面向高功率激光应用的掺铟光纤成熟度较低。

高功率单频掺铟光纤激光未来发展可从以下几点展开:

(1) 发展新材料

掺铟光纤激光功率受限的根本原因在于硅基光纤铟离子的掺杂浓度受限。目前也发展出多组分软玻璃光纤能够实现稀土离子高浓度掺杂,但多组分光纤熔接损耗、系统稳定性等方面表现欠佳。研制与硅基光纤相兼容的新型高掺杂光纤无疑是高功率单频掺铟光纤激光的重要方向。

(2) 发展新结构

类比单频掺铟光纤激光的发展趋势,SBS 和传输模式不稳定(TMI)也将是限制单频掺铟光纤激光功率提升的两个主要因素。增大光纤模场面积有助于

提高 SBS 阈值, 却容易产生高阶模, 不利于抑制 TMI。需要综合考虑抑制这两个 SBS 和 TMI 的矛盾之处, 研发新型特殊结构的增益光纤以同时提高这两个非线性阈值。

(3) 发展新泵浦激光

9xx nm 泵浦带来的巨大量子亏损以热的形式在光纤中耗散, 不利于系统稳定性。发展新型同带高功率泵浦激光有望成为突破单频掺铒光纤激光器功率输出的关键技术手段。

未来单频掺铒光纤激光技术将向更高功率、更窄线宽的方向发展, 面向实际应用需求, 同时还需要保证全保偏光纤结构和近衍射极限输出。

参考文献:

- [1] Bellemare A. Continuous-wave silica-based erbium-doped fiber lasers [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, 27(4): 211-266.
- [2] Wagener J L, Wysocki P F, Dignonnet M J F, et al. Effects of concentration and clusters in erbium-doped fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 1993, 18(23): 2014-2016.
- [3] Yang Z, Li C, Xu S, et al. Single-Frequency Fiber Lasers[M]. Singapore: Springer Nature, 2019.
- [4] Morkel P R, Cowle G J, Payne D N. Travelling-wave erbium fiber ring laser with 60 kHz linewidth [J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(10): 632-634.
- [5] Iwatsuki K, Okamura H, Saruwatari M. Wavelength-tunable single-frequency and single-polarisation Er-doped fiber ring-laser with 1.4 kHz linewidth [J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(24): 2033-2035.
- [6] Smith D A, Maeda M W, Johnson J J, et al. Acoustically tuned erbium-doped fiber ring laser [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(6): 387-389.
- [7] Schmuck H, Pfeiffer T, Veith G. Widely tunable narrow linewidth erbium doped fiber ring laser [J]. *Electronics Letters*, 1991, 27(23): 2117-2119.
- [8] Zyskind J L, Sulhoff J W, Sun Y, et al. Singlemode diode-pumped tunable erbium-doped fiber laser with linewidth less than 5.5 kHz [J]. *Electronics Letters*, 1991, 27(23): 2148-2149.
- [9] Cheng Y, Kringelbotn J T, Loh W H, et al. Stable single-frequency traveling-wave fiber loop laser with integral saturable-absorber-based tracking narrow-band filter [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(8): 875-877.
- [10] 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.
- [11] Chen H X, Babin F, Leblanc M, et al. Widely tunable single-frequency erbium-doped fiber lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(2): 185-187.
- [12] Chien H C, Yeh C H, Lee C C, et al. A tunable and single-frequency s-band erbium fiber laser with saturable-absorber-based autotracking filter [J]. *Optics Communications*, 2005, 250(1): 163-167.
- [13] Yeh C H, Lin M C, Chi S. Stabilized and wavelength-tunable s-band erbium-doped fiber ring laser with single-longitudinal-mode operation [J]. *Optics Express*, 2005, 13(18): 6828-6832.
- [14] Polynkin A, Polynkin P, Mansuripur M, et al. Single-frequency fiber ring laser with 1 W output power at 1.5 μm [J]. *Optics Express*, 2005, 13(8): 3179-3184.
- [15] Yang X X, Zhan L, Shen Q S, et al. High-power single-longitudinal-mode fiber laser with a ring Fabry-Perot resonator and a saturable absorber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(9-12): 879-881.
- [16] Zhang J L, 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.
- [17] Lee C C, Chi S. Single-longitudinal-mode operation of a grating-based fiber-ring laser using self-injection feedback [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(24): 1774-1776.
- [18] Lee C C, Chen Y K, Liaw S K. Single-longitudinal-mode fiber laser with a passive multiple-ring cavity and its application for video transmission [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(5): 358-360.
- [19] Xin Z, Ning Hua Z, Liang X, et al. Stabilized and tunable single-frequency erbium-doped fiber ring laser employing external injection locking [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(4): 1027-1033.
- [20] Yeh C H, Huang T T, Chien H C, et al. Tunable S-band erbium-doped triple-ring laser with single-longitudinal-mode operation [J]. *Optics Express*, 2007, 15(2): 382-386.
- [21] Pan S, Yao J. A Wavelength-tunable single-longitudinal-mode fiber ring laser with a large sidemode suppression and improved stability [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(6): 413-415.

- [22] Salehiomran A, Rochette M. An all-pole-type cavity based on smith predictor to achieve single longitudinal mode fiber lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(21): 2141-2144.
- [23] 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.
- [24] 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)
- [25] Yang C, Xu S, Li C, et al. Research progress of 1.5 μm -band CW single-frequency fiber laser [J]. *Scientia Sinica Chimica*, 2013, 43(11): 1407-1417. (in Chinese)
- [26] Fu S J, 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-Optical Physics*, 2017, 34(3): A49-A62.
- [27] 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): 121001. (in Chinese)
- [28] Ball G A, Morey W W, Glenn W H. Standing-wave monomode erbium fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1991, 3(7): 613-615.
- [29] Ball G A, Morey W W. Compression-tuned single-frequency Bragg grating fiber laser [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(23): 1979-1981.
- [30] Zhang Y N, Zhang Y F, Zhao Q L, et al. Ultra-narrow linewidth full C-band tunable single-frequency linear-polarization fiber laser [J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26209-26214.
- [31] Yang C S, Guan X C, Lin W, et al. Efficient 1.6 μm linearly-polarized single-frequency phosphate glass fiber laser [J]. *Optics Express*, 2017, 25(23): 29078-29085.
- [32] Spiegelberg C, Geng J, Hu Y, et al. Compact 100 mW fiber laser with 2 kHz linewidth [C]// Optical Fiber Communications Conference, 2003, 3: PD45-P1.
- [33] Spiegelberg C, Geng J H, Hu Y D, et al. Low-noise narrow-linewidth fiber laser at 1550 nm (June 2003) [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 57-62.
- [34] Polynkin P, Polynkin A, Mansuripur M, et al. Single-frequency laser oscillator with watts-level output power at 1.5 μm by use of a twisted-mode technique [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(20): 2745-2747.
- [35] Qiu T, Suzuki S, Schulzgen 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.
- [36] Schulzgen 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.
- [37] 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.
- [38] Xu S H, Yang Z M, 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.
- [39] Chang S H, Hwang I K, Kim B Y, et al. Widely tunable single-frequency Er-doped fiber laser with long linear cavity [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(4): 287-289.
- [40] Kaneda Y, Hu Y, Spiegelberg C, et al. Single-frequency, all-fiber Q-switched laser at 1550 nm [C]// Proceedings of the Advanced Solid-State Photonics (TOPS), 2004.
- [41] Zhou R, Shi W, Petersen E, et al. Transform-limited, injection seeded, Q-switched, ring cavity fiber laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(16): 2589-2595.
- [42] Wan H D, Wu Z W, Sun X H. A pulsed single-longitudinal-mode fiber laser based on gain control of pulse-injection-locked cavity [J]. *Optics Laser Technology*, 2013, 48: 167-170.
- [43] Shi W, Leigh M A, Zong J, et al. High-power all-fiber-based narrow-linewidth single-mode fiber laser pulses in The C-Band and frequency conversion to THz generation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 377-384.
- [44] Leigh M, Shi W, Zong J, et al. High peak power single frequency pulses using a short polarization-maintaining phosphate glass fiber with a large core [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(18): 1-3.
- [45] Shi W, Petersen E B, Leigh M, et al. High SBS-threshold single-mode single-frequency monolithic pulsed fiber laser in the C-band [J]. *Opt Express*, 2009, 17(10): 8237-8245.
- [46] Shi W, Petersen E B, Yao Z D, et al. Kilowatt-level stimulated-Brillouin-scattering-threshold monolithic transform-limited 100 ns pulsed fiber laser at 1530 nm [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2418-2420.

- [47] Petersen E, Shi W, Chavez-pirson A, et al. High peak-power single-frequency pulses using multiple stage, large core phosphate fibers and preshaped pulses [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(5): 531-534.
- [48] Liu Y, Liu J Q, Chen W B. Eye-safe, single-frequency pulsed all-fiber laser for Doppler wind lidar [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(9): 090604.
- [49] Lee W, Geng J, Jiang S, et al. 1.8 mJ, 3.5 kW single-frequency optical pulses at 1572 nm generated from an all-fiber MOPA system [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(10): 2264-2267.
- [50] Zhang X, Diao W F, Liu Y, et al. Eye-safe single-frequency single-mode polarized all-fiber pulsed laser with peak power of 361 W [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(11): 2465-2469.
- [51] Ball G A, Holton C E, Hullallen G, et al. 60-mW 1.5 μm single-frequency low-noise fiber laser MOPA [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1994, 6(2): 192-194.
- [52] Pan J J, Shi Y. 166-mW single-frequency output power interactive fiber lasers with low noise [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11(1): 36-38.
- [53] Jeong Y, Salm J K, Richardson D J, et al. Seeded erbium/ytterbium codoped fiber amplifier source with 87 W of single-frequency output power [J]. *Electronics Letters*, 2003, 39(24): 1717-1719.
- [54] Alam S U, Wixey R, Hickey L, et al. High power, single-mode, single-frequency DFB fiber laser at 1550 nm in MOPA configuration[C]//Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics, 2004 (CLEO), F, 2004.
- [55] Alegria C, Jeong Y, Codemard C, et al. 83-W single-frequency narrow-linewidth MOPA using large-core erbium-ytterbium codoped fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(8): 1825-1827.
- [56] Jeong Y, Sahu J K, Soh D B S, et al. High-power tunable single-frequency single-mode erbium: ytterbium codoped large-core fiber master-oscillator power amplifier source [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(22): 2997-2999.
- [57] Dubinskii M, Zhang J, Kudryashov I. Single-frequency, Yb-free, resonantly cladding-pumped large mode area Er fiber amplifier for power scaling [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(3): 1-3.
- [58] Yang C S, Xu S H, Mo S P, et al. 10.9 W kHz-linewidth one-stage all-fiber linearly-polarized MOPA Laser at 1560 nm [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12546-12551.
- [59] Steinke M, Croteau A, Pare C, et al. Co-seeded Er^{3+} : Yb^{3+} single frequency fiber amplifier with 60 w output power and over 90% TEM_{00} content [J]. *Optics Express*, 2014, 22(14): 16722-16730.
- [60] Bai X L, Sheng Q, Zhang H W, et al. High-power all-fiber single-frequency erbium-ytterbium co-doped fiber master oscillator power amplifier [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(6): 6.
- [61] Creeden D, Pretorius H, Limongelli J, et al. Single frequency 1560 nm Er: Yb fiber amplifier with 207 W output power and 50.5% slope efficiency[C]//Proceedings of the Conference on Fiber Lasers XIII -Technology, Systems, and Applications, F, 2016.
- [62] De Varona O, Fittkau W, Booker P, et al. Single-frequency fiber amplifier at 1.5 μm with 100 W in the linearly-polarized TEM_{00} Mode for next-generation gravitational wave detectors [J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 24880-24892.
- [63] Yang C S, Guan X C, Zhao Q L, et al. 15 W high OSNR kHz-linewidth linearly-polarized all-fiber single-frequency MOPA a 1.6 μm [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 12863-12869.
- [64] Guan X C, Zhao Q L, Lin W, et al. High-efficiency and high-power single-frequency fiber laser at 1.6 μm based on cascaded energy-transfer pumping [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(3): 414-420.
- [65] Xue M Y, Gao C X, Niu L Q, et al. A 51.3 W, sub-kHz-linewidth linearly polarized all-fiber laser at 1560 nm [J]. *Laser Physics*, 2020, 30(3): 035104.
- [66] Darwich D, Bardin Y V, Goepfner M, et al. Ultralow-intensity noise, 10 W all-fiber single-frequency tunable laser system around 1550 nm [J]. *Applied Optics*, 2021, 60(27): 8550-8555.
- [67] Kuhn V, Kracht D, Neumann J, et al. Er-doped single-frequency photonic crystal fiber amplifier with 70 W of output power for gravitational wave detection[C]//Proceedings of the Conference on Fiber Lasers IX - Technology, Systems, and Applications, 2012.
- [68] Fujisaki A, Matsushita S, Kasai K, et al. An 11.6 W output, 6 kHz linewidth, single-polarization EDFA-MOPA system with a $^{13}\text{C}_2\text{H}_2$ frequency stabilized fiber laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23(2): 1081-1087.
- [69] Dong J Y, Zeng X, Cui S Z, et al. More than 20 W fiber-based continuous-wave single frequency laser at 780 nm [J]. *Optics Express*, 2019, 27(24): 35362-35367.
- [70] Alam S, Yla-jarkko K H, Grudinin A B. High power, single frequency DFB fiber laser with low relative intensity noise[C]//Proceedings of the 2003 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe (CLEO/Europe 2003) (IEEE Cat No03 TH8666),

- 2003: 618.
- [71] De Varona O, Steinke M, Neumann J, et al. All-fiber, single-frequency, and single-mode Er³⁺:Yb³⁺ fiber amplifier at 1556 nm core-pumped at 1018 nm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(11): 2632-2635.
- [72] Wang S, Liu Z, Zhao Z, et al. 18 W Single-frequency 1550 nm Er: Yb co-doped fiber amplifier cladding-pumping at 1018 nm [J]. *Optics Communications*, 2020, 464: 125498.
- [73] Kuhn V, Kracht D, Neumann J, et al. Dependence of Er: Yb-codoped 1.5 μm amplifier on wavelength-tuned auxiliary seed signal at 1 μm wavelength [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(24): 4105-4107.
- [74] Sobon G, Sliwinska D, Kaczmarek P, et al. Er/Yb co-doped fiber amplifier with wavelength-tuned Yb-band ring resonator [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(18): 3816-3819.
- [75] Dubinskii M, Zhang J, Ter-mikirtychev V. Record-efficient, resonantly-pumped, Er-doped single mode fiber amplifier [J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(8): 400-401.
- [76] Supradeepa V R, Nicholson J W. Power scaling of high-efficiency 1.5 μm cascaded Raman fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2538-2541.