

高功率铒镱共掺光纤激光器研究进展

程永师, 陈瑰, 李进延*

华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074

摘要 高功率铒镱共掺光纤激光器因具有“人眼安全”和在光纤及大气中的低损耗特性, 广泛用于光纤通信、激光雷达、卫星遥感和精密测量中。简要介绍了铒镱共掺光纤及其激光系统的发展历程, 着重阐述了其在高功率窄线宽方面的最新研究进展, 分析了制约铒镱共掺光纤激光器功率攀升的因素。针对镱波段放大的自发辐射和光纤热效应, 分别从光纤材料与结构和激光系统结构两个方面进行优化, 以实现更高输出功率的铒镱共掺光纤激光器。

关键词 激光器; 高功率激光器; 铒镱共掺光纤; 窄线宽激光器; 镱波段放大的自发辐射

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.170607

Research Progress of High-Power Erbium-Ytterbium Codoped Fiber Laser

Cheng Yongshi, Chen Gui, Li Jinyan*

Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract High-power erbium-ytterbium codoped fiber lasers have been widely applied to optical fiber communication, lidar, satellite remote sensing, and precision measurement owing to its “eye safety” and low loss characteristics in both optical fibers and atmosphere. This study briefly introduces the developments of the erbium-ytterbium codoped fiber and associated laser system and emphatically expounds the latest progress in research on erbium-ytterbium codoped fiber lasers with high power and narrow linewidth. Additionally, we analyzes factors which restrict the increase of power of the erbium-ytterbium codoped fiber laser. In view of ytterbium-band amplified spontaneous emissions and optical fiber thermal effects, optical fiber and laser system structures are optimized to realize an erbium-ytterbium codoped fiber laser with higher output power.

Key words lasers; high power lasers; erbium-ytterbuim codoped fiber; narrow linewidth lasers; ytterbium-band amplified spontaneous emission

OCIS codes 140.3510; 140.3360; 140.3480

1 引言

随着高功率半导体激光技术和包层抽运技术的成熟, 光纤激光器的输出功率飞速攀升, 从毫瓦级增至万瓦级^[1-2]。相比于万瓦量级的 $1\ \mu\text{m}$ 掺镱光纤激光器, 百瓦量级的 $1.5\ \mu\text{m}$ 高功率光纤激光器, 由于其具有低大气传输衰减和高人眼损伤阈值^[3], 在卫星遥感^[4]、激光雷达^[5]、空间光通信^[6]等领域有着极大的应用需求。

实现 $1.5\ \mu\text{m}$ 高功率光纤激光器的方案主要有

三种。1) 拉曼光纤激光器, 2013 年 Supradeepa 等^[7]通过 5 级拉曼频移在 $1480\ \text{nm}$ 实现了 $301\ \text{W}$ 的功率输出。该类型激光器常作为抽运源用于同带抽运掺铒/铒镱共掺光纤激光器^[8]。2) 掺铒光纤激光器^[9-10], 2012 年 OFS Lab^[11]采用 $1480\ \text{nm}$ 拉曼激光器抽运实现 $1554\ \text{nm}\ 101\ \text{W}$ 激光输出, 斜率效率高达 75%。由于高功率的同带抽运源获取难度大, 限制了其更高功率输出。在采用 $976\ \text{nm}$ 半导体抽运源方面, 南安普顿大学光电研究中心(ORC)^[12]于

收稿日期: 2019-06-12; 修回日期: 2019-06-23; 录用日期: 2019-07-01

基金项目: 国家重点研发项目(2017YFB1104400)、国家自然科学基金(61735007)

* E-mail: ljy@hust.edu.cn

2018年基于146/700 μm 超大芯径掺铒光纤实现1601 nm 656 W 激光输出,但由于超大芯径带来的激光光束质量差,其主要应用仅限于掺铒光纤激光器的抽运源。3) 铒镱共掺光纤激光器,早在2007年Jeong等^[13]基于线性腔振荡结构实现了1567 nm 297 W 激光输出。由于铒镱共掺光纤高增益、大吸收截面和高能量转化效率,一直被认为是1.5 μm 实现高功率输出的最佳选择。同时,高功率铒镱共掺光纤激光系统可实现超窄线宽,具有良好的光束质量和噪声特性,使其在激光测距^[14]、引力波测量^[15]等应用上优势显著。

本文首先介绍了高功率铒镱共掺光纤激光器的研究现状,主要从铒镱共掺光纤及其激光系统的发展历程和近年来研究较多的高功率窄线宽光纤激光器两方面展开介绍;随后分析了在铒镱共掺光纤激光系统中制约其功率攀升的主要原因,包括光纤热效应、受激布里渊散射和铒波段放大的自发辐射(Yb-ASE);最后从光纤材料与结构、激光系统结构两个方面阐述了抑制Yb-ASE的方案。

2 铒镱共掺光纤及光纤激光器的发展

铒离子能级结构复杂,在高浓度掺杂下易出现浓度猝灭,且吸收截面相对较小。镱离子的共掺,能分散铒离子、减少离子聚集,从而降低高浓度铒掺杂时的浓度猝灭。同时,通过交叉弛豫过程镱离子敏化铒离子,有效提升铒镱共掺光纤对抽运光的吸收。1987年,南安普顿大学ORC团队基于改进化学气相沉积工艺(MCVD)和液相掺杂技术制备出第一根石英基铒镱共掺光纤^[16]。1992年,澳大利亚悉尼大学光纤技术中心^[17]通过类似于溶胶凝胶法的快速凝固技术制备出 P_2O_5 含量高达17%(摩尔分数)的铒镱共掺光纤,掺P含量的提高,有利于实现稀土离子的重掺杂。1996年,南安普顿大学ORC团队^[18]研究发现P=O双键的高声子能量特性有利于抑制处于激发态的 Er^{3+} 向 Yb^{3+} 的能量反传递,提高能量传递效率。因此,至今商用的铒镱共掺光纤纤芯基质均为磷硅酸盐。

国内,MCVD和液相掺杂技术制备的铒镱共掺光纤最早报道于2004年^[19]。2007年中国电子科技集团第46研究所^[20]基于MCVD工艺制备的铒镱共掺光纤在976 nm处的包层吸收系数达2 dB/m。2012年,华中科技大学李进延团队^[21]基于反向沉积的MCVD工艺实现了重掺P,获得在976 nm吸收系数为2.3 dB/m的双包层铒镱共掺光纤(DC

EYDF),并利用该光纤实现了3.2 W 激光输出。总体而言,国内MCVD技术制备铒镱共掺光纤的难点主要集中于纤芯中 P_2O_5 的高浓度掺入、稀土离子的掺入比例优化和低损耗控制。

近年来,为了提高激光器的输出功率同时保证其光束质量,降低非线性效应阈值,大模场低数值孔径(NA)光纤逐渐成为了研究热点。对于铒镱共掺光纤,由于纤芯中P的含量为10%~17%(摩尔分数),使得其数值孔径为0.11~0.17,限制了单模运转的光纤最大芯径为11 μm 。为了实现大模场单模运转,主要有两种技术方案:一是采用三包层结构,降低纤芯与内包层折射率差。2014年,加拿大国家光学研究所(INO)^[22]通过MCVD制备了三包层铒镱共掺光纤,如图1(a)所示,其中纤芯为 Er_2O_3 、 Yb_2O_3 、 P_2O_5 共掺,第一内包层为 GeO_2 、 P_2O 共掺,第二内包层为纯 SiO_2 ,制备出纤芯与第一内包层NA为0.09,纤芯为23 μm 的大模场光纤,再通过纤芯折射率呈“W”型滤除高阶模,如图1(b)所示,从而实现大模场单模运转。此外,Nufer公司采用三包层结构制备出纤芯与第一内包层数值孔径为0.09的光纤(LMA-EYDF-25P/300-HE)。二是纤芯高掺氟技术,2019年,俄罗斯科学院^[23]通过MCVD结合气相掺杂技术在纤芯中掺入0.9%(质量分数)的F,从而制备出纤芯20 μm ,NA为0.07~0.08的大模场单模光纤。

首台铒镱共掺光纤激光器(EYDFL)^[24]报道于1988年。此时,由于增益光纤和抽运源的限制,输出功率仅为1.5 mW。得益于Snitzer提出的双包层光纤结构,激光器功率逐渐突破瓦级^[25],2003年,Sahu等^[26]通过单端975 nm空间包层抽运方式实现1.57 μm 103 W连续激光输出,高功率抽运下,铒镱共掺激光器功率实现百瓦量级输出。2007年,Jeong等^[13]报道的单端975 nm空间包层抽运激光器,最大输出功率达297 W,当输出激光功率高于210 W时,产生了镱离子1.06 μm 寄生激光,激光斜率效率显著降低,由43%降至19%。2014年,加拿大拉瓦尔大学^[27]制备了17/125 μm 的铒镱共掺光纤,其中该光纤为铝磷硅酸盐基质,通过调整铒镱共掺比例,实现1585 nm 264 W激光输出,光光效率达74%。国内,铒镱共掺激光器最早报道于2003年^[28],2013年复旦大学沈德元团队^[29]基于975 nm空间包层泵源25/400铒镱共掺光纤实现了77 W激光输出,斜率效率为37%。表1列举了几个典型的高功率铒镱共掺光纤激光系统。

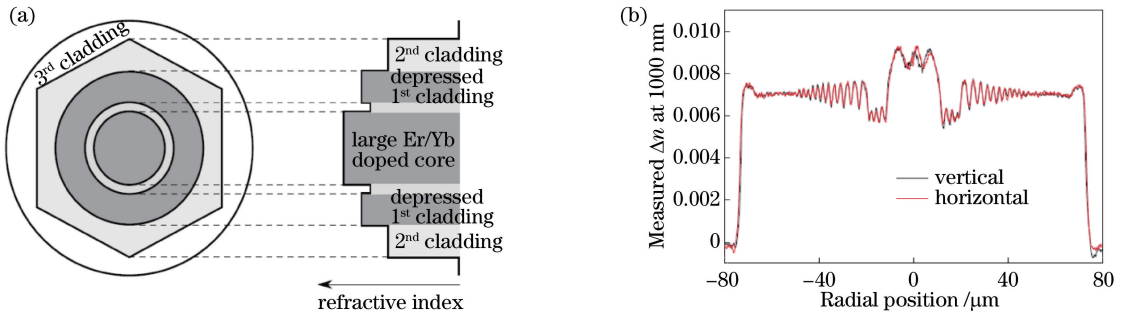


图 1 三包层铒镱共掺光纤。(a)光纤剖面几何结构;(b)光纤折射率剖面图^[22]
 Fig. 1 Erbium-ytterbium codoped triple-clad fiber. (a) Geometry structure of triple-clad fiber profile;
 (b) refractive index profile of triple-clad fiber^[22]

表 1 高功率铒镱共掺光纤激光器的代表

Table 1 Representations of high-power erbium-ytterbium codoped fiber lasers

Reference	Gain medium	Output power	Pump power	Slope efficiency	System type
Ref. [26]	24/400 DC EYDF	103 W@1570 nm	340 W@975 nm	40%-30%	Oscillator
Ref. [30]	24/400 DC EYDF	87 W@1563 nm	340 W@975 nm	27%	MOPA
Ref. [13]	30/600 DC EYDF	297 W@1567 nm	1.2 kW@975 nm	43%-19%	Oscillator
Ref. [28]	17/125 DC EYDF	264 W@1585 nm	370 W@1535 nm	74%	Oscillator
Ref. [31]	25/300 DC EYDF	207 W@1556 nm	410 W@940 nm	50.5%	MOPA

随着铒镱共掺光纤激光器在自由空间光通信、激光雷达、引力波探测等高新科技中的应用,超窄线宽、近散粒噪声极限、近衍射极限的高功率窄线宽铒镱共掺光纤激光器成为了研究热点。2004年,南安普顿大学 Alegria 等^[32]以窄线宽分布式反馈半导体激光器(LD)为种子源,基于三级主振荡功率放大(MOPA)结构采用 30/400 双包层铒镱共掺光纤,实现了 1552 nm 83 W 连续激光输出,线宽为 13 kHz。2005年,该团队 Jeong 等^[33]以线宽小于 1 MHz 外腔可调的 LD 为种子源,搭建了两级 MOPA 结构,实现了在 1563 nm 处 151 W 的单频输出。

窄线宽激光器的种子源直接决定了最终输出激光的线宽特性。目前,超窄线宽种子源多选用美国

NP Photonics 产品,该公司于 2001 年制备了 1535 nm 处吸收系数为 5 dB/cm 的磷酸盐铒镱共掺光纤^[35],2004 年利用此光纤作为增益介质搭建如图 2(a)所示的窄线宽激光器^[34],其中 C 波段的一对宽带光纤布拉格光栅(WB-FBG)和窄带光纤布拉格光栅(NB-FBG)构成谐振腔,如图 2(b)所示,实现了小于 2 kHz 的窄线宽激光输出,激光相干长度大于 5 km。国内华南理工大学等高校和科研院采用管棒法制备高浓度铒镱共掺磷酸盐光纤,并基于该增益光纤实现超窄线宽种子源。2009 年华南理工大学报道了在 1535 nm 吸收系数高达 12.6 dB/cm 的磷酸盐铒镱共掺光纤^[36],2010 年利用自制的磷酸盐光纤搭建了线宽小于 2 kHz 的窄线宽分布式反馈光纤激光器^[37]。

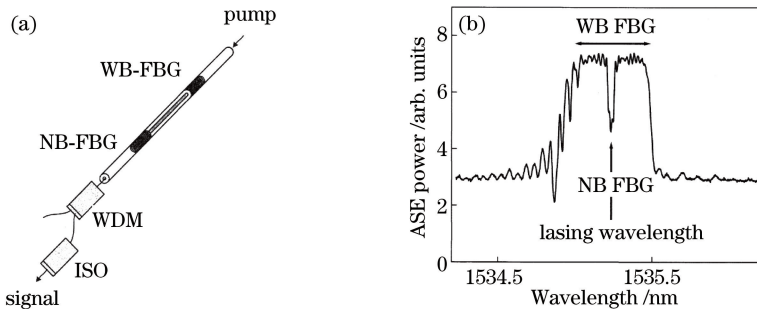


图 2 1535 nm 窄线宽激光器。(a)激光器结构图;(b)未达阈值时的 ASE 图谱^[34]

Fig. 2 1535 nm fiber laser with narrow linewidth. (a) Schematic of laser; (b) ASE below threshold^[34]

外, $1\ \mu\text{m}$ 激光输出降低了“人眼安全”特性,使钕镱共掺光纤激光器的应用严重受限。为改善 Yb-ASE 问题,可从优化光纤和优化激光系统结构两个方面进行。光纤方面,通常基于光纤组份调节或光纤结构设计来实现 Yb-ASE 性能的改善;激光系统方面,通过降低镱离子激发效率或提取镱离子激发态能量来控制 Yb-ASE。

3.1 优化光纤组分与结构设计

优化光纤组分主要是通过剪裁镱离子的比例,降低处于激发态镱离子的数目,提高镱离子向钕离子交叉弛豫的能量传递效率,从而抑制 Yb-ASE。优化纤芯掺杂离子能从根本上改善 Yb-ASE,提高光纤性能。Nufern 公司 2008 年推出了新一代 EYDF(SM-EYDF-6/125-HE),该光纤具有低 Yb-ASE 的性能。2018 年 iXblue 公司^[47]优化纤芯组分,通过 12/125 的钕镱共掺光纤实现在输出功率为 20 W 时,仅有 1 mW 的 Yb-ASE 产生,斜率效率达 46.3%。

光纤结构设计方面,主要是引入特殊的结构,增加镱离子波段传输衰减,抑制 Yb-ASE。2008 年 Shirakawa 等^[48]利用光子晶体光纤(PCF)对短波长光的滤波作用,通过合适的弯曲半径有效滤除 Yb-ASE,保证了 $1.55\ \mu\text{m}$ 信号光输出的稳定性。2014

年,Ouyang 等^[49]在有源光纤两端分别熔接一段光子带隙光纤来衰减 Yb-ASE,提高其产生寄生激光的阈值。

3.2 优化光纤系统结构

非峰值抽运方案是抑制 Yb-ASE 的有效途径之一。非峰值抽运采用波长为 940 nm 或 915 nm 的激光器进行抽运,而避免使用常用的镱离子吸收峰 976 nm 的半导体抽运源,从而降低镱离子激发效率。

2016 年,Creeden 等^[31]首次提出用 940 nm LD 作为抽运源,搭建两级 MOPA 结构,如图 4 所示,其中放大级利用 6 个 940 nm LD 作为抽运源通过反向抽运进入 25/300 的钕镱共掺光纤中,最终实现了 1560 nm 无 Yb-ASE 的 207 W 激光输出,斜率效率为 50.5%。与之相比,同一结构同等增益 976 nm LD 抽运的斜率效率为 40.2%。2017 年,该团队^[50]对该方案进行模拟,认为 940 nm LD 抽运降低了镱离子的激发效率,减少了处于激发态的 Yb^{3+} 数,不仅提高了激光器的斜率效率,还增加了 Yb-ASE 的阈值。2017 年,Varona 等^[15]用 940 nm LD 作为抽运源,实现了在 1556 nm 处 100 W 的激光连续输出,无镱波段寄生激光产生。2018 年 Booker 等^[51]通过理论模拟证明了用 915 nm 或者 940 nm 抽运源抽运可以降低 Yb-ASE 和 SBS 的阈值。

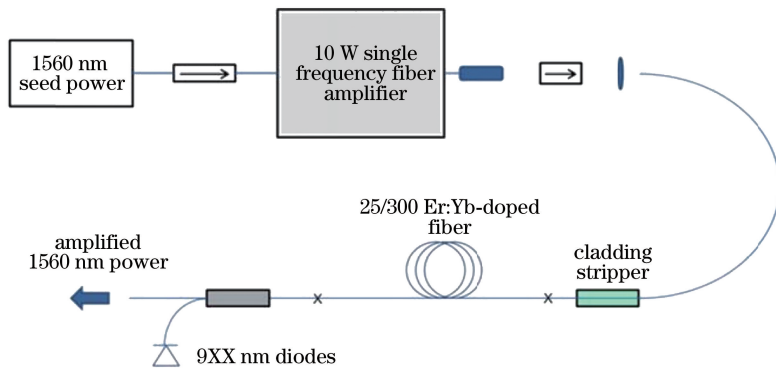


图 4 非峰值抽运高功率钕镱共掺光纤放大器的结构^[31]

Fig. 4 Structure of erbium-ytterbium codoped fiber amplifier with off-peak-pumped high power^[31]

通过在激光系统中添加辅助抽运源^[46, 52]、环形器^[53-54]或光栅^[55-57]来增加反馈,是在放大器结构中常采用的抑制 Yb-ASE 的方案。通过上述方法增加反馈,可以提取镱离子激发态能量,使之以受激辐射的形式产生激光,从而抑制 Yb-ASE。主动促进 $1\ \mu\text{m}$ 激光激发能有效抑制寄生激光和自脉冲的出现^[52],大大提高放大器的工作稳定性,并使 $1.55\ \mu\text{m}$ 信号光的输出功率获得提升。同时形成的激光可通

过“二次抽运”方式,再次激发稀土离子从而提高斜率效率。

2014 年, Sobon 团队搭建了利用两个单模 WDM 构成 1060 nm 环形谐振腔的全光纤两级 MOPA 结构,如图 5 所示,实现了抑制 Yb-ASE 的单模 10 W 输出^[54]。其中在环形器的输出端刻上一个透射特定波长的 FBG,从而实现波长可调,增加结构的灵活性。

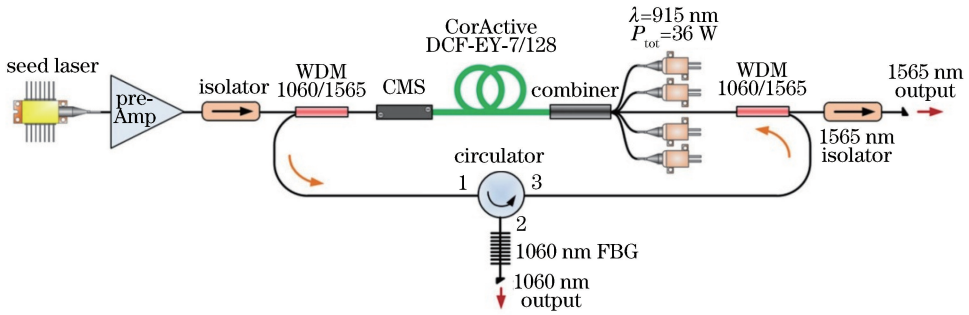


图 5 拥有 Yb 带环形谐振腔的全光纤 MOPA 结构^[54]

Fig. 5 All-fiber MOPA structure with Yb band ring resonator^[54]

反向传输的 ASE 是影响放大器工作稳定性的主要因素。2015 年, Han 等^[55] 提出通过引入 1032 nm 光纤布拉格光栅 (FBG) 用于反射后向 Yb-ASE, 产生与抽运传输方向相同的镱离子激光。镱波段辅助信号光的受激放大和重吸收效应, 使 Yb-ASE 显著降低, 放大器的抽运转化效率大大提升, 输出功率与未加 FBG 的结构相比提高 20%。2017 年, 该团队^[58] 提出引入一对中心波长为 1031 nm 的 FBG 构成镱带谐振腔, 当抽运功率为 17 W 时, 输出信号功率为 7.25 W, 斜率效率达到 42.6%, 无 Yb-ASE, 且有很好的增益平坦效应。

4 结 论

铟镱共掺光纤通常采用 MCVD 结合液相掺杂技术制备, 在制备过程中需要实现易挥发元素磷的高浓度均匀掺杂, 同时避免纤芯损耗增加、折射率中心凹陷和高数值孔径等问题。为了满足铟镱共掺光纤激光器实现高输出功率、高光束质量、超窄线宽、无 Yb-ASE、无 SBS 和较好的噪声性能等, 大模场面积、低数值孔径增益光纤将成为未来铟镱共掺光纤的主要发展方向。其中三包层光纤和纤芯重掺杂是实现大模场单模运转比较成熟的解决方案。

1.5 μm 高功率激光器方面, 由于掺铟大模场光纤制备技术逐渐成熟, 掺铟光纤激光器实现了最高 656 W 的激光输出, 使之成为在该波段实现高功率输出的主要方案之一; 铟镱共掺光纤激光器以其频谱线宽窄、增益高、光束质量佳、噪声性能好等优势仍然为该波段的主流研究方向。铟镱共掺光纤激光器在功率攀升方面的主要瓶颈在于高抽运功率下镱离子放大自发辐射和 975 nm 抽运存在较高的量子亏损。解决上述问题从激光器角度出发一般采用以下两种方式: 一是非峰值抽运, 以 940 nm LD 作为抽运源, 使抽运吸收和增益被均匀地分布在整個光

纤中, 增加了 Yb-ASE 的阈值, 降低了光纤热效应; 二是调整激光器结构, 通过辅助抽运法, 将镱离子过剩的上能级能量提取出来形成激光, 对铟镱共掺光纤进行“二次抽运”, 不仅可以抑制 Yb-ASE, 而且可以提高激光效率。非峰值抽运结合辅助信号抽运法将是未来实现铟镱共掺光纤激光器高功率输出的最主要方案之一。随着铟镱共掺光纤激光器在高功率和窄线宽方面的进一步突破, 其在激光测距、自由空间光通信和引力波测量等方面的应用范围将进一步扩大。

参 考 文 献

- [1] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [Invited] [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.
- [2] Chen X L, Lou F G, He Y, *et al.* Home-made 10 kW fiber laser with high efficiency [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0336001. 陈晓龙, 楼风光, 何宇, 等. 高效率国产化 10 kW 光纤激光器 [J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0336001.
- [3] Philippov V N, Sahu J K, Codemard C A, *et al.* All-fiber 1.15-mJ pulsed eye-safe optical source [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5335: 1-7.
- [4] Kehayas E, Stampoulidis L, Henderson P, *et al.* The European project Hippo high-power photonics for satellite laser communications and on-board optical processing [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 10563: 105635C.
- [5] Dolfi-Bouteyre A, Canat G, Valla M, *et al.* Pulsed 1.5- μm LIDAR for axial aircraft wake vortex detection based on high-brightness large-core fiber amplifier [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(2): 441-450.
- [6] Bloom S, Korevaar E, Schuster J, *et al.*

- Understanding the performance of free-space optics [Invited] [J]. *Journal of Optical Networking*, 2003, 2(6): 178-200.
- [7] 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.
- [8] Feng Y, Jiang H W, Zhang L. Advances in high power Raman fiber laser technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201005.
冯衍, 姜华卫, 张磊. 高功率拉曼光纤激光器技术研究进展[J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201005.
- [9] Zhang J, Fromzel V, Dubinskii M. Resonantly cladding-pumped Yb-free Er-doped LMA fiber laser with record high power and efficiency [J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 5574-5578.
- [10] Kotov L V, Likhachev M E, Bubnov M M, *et al.* Yb-free Er-doped all-fiber amplifier cladding-pumped at 976 nm with output power in excess of 100 W [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8961: 89610X.
- [11] Jebali M A, Maran J N, LaRochelle S, *et al.* A 103 W high efficiency in-band cladding-pumped 1593 nm all-fiber erbium-doped fiber laser [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics 2012*, May 6-11, 2012, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2012: JTh1.3.
- [12] Lin H Q, Feng Y J, Feng Y T, *et al.* 656 W Er-doped, Yb-free large-core fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(13): 3080-3083.
- [13] Jeong Y, Yoo S, Codemard C A, *et al.* Erbium:ytterbium codoped large-core fiber laser with 297-W continuous-wave output power [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 573-579.
- [14] Philippov V, Codemard C, Jeong Y, *et al.* High-energy in-fiber pulse amplification for coherent lidar applications [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(22): 2590-2592.
- [15] de Varona O, Fittkau W, Booker P, *et al.* Single-frequency fiber amplifier at 1.5 μm with 100 W in the linearly-polarized TEM₀₀ mode for next-generation gravitational wave detectors [J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 24880-24892.
- [16] Townsend J E, Poole S B, Payne D N. Solution-doping technique for fabrication of rare-earth-doped optical fibres [J]. *Electronics Letters*, 1987, 23(7): 329-331.
- [17] Carter A L G, Poole S B, Sceats M G. A flash-condensation technique for the fabrication of high phosphorous content rare-earth doped fibres [C] // *Optical Amplifiers and Their Applications*, June 24, 1992, Sante Fe, New Mexico, United States. Washington, D.C.: OSA, 1992: PD6.
- [18] Vienne G G, Brocklesby W S, Brown R S, *et al.* Role of aluminum in ytterbium-erbium codoped phosphoaluminosilicate optical fibers [J]. *Optical Fiber Technology*, 1996, 2(4): 387-393.
- [19] Liu X J, Li J Y, Jiang Z W, *et al.* Manufacture of Er³⁺/Yb³⁺ co-doped fiber and its spectrum analysis [J]. *Study on Optical Communications*, 2004, (5): 52-54.
刘学军, 李进延, 蒋作文, 等. Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤的研制与光谱分析 [J]. *光通信研究*, 2004, (5): 52-54.
- [20] Yi Y Q, Zhou S W, Ning D, *et al.* Study of the ytterbium-erbium co-doped double-clad optical fibers [J]. *Laser & Infrared*, 2007, 37(3): 259-261.
衣永青, 周述文, 宁鼎, 等. 钕铒共掺双包层光纤的研究 [J]. *激光与红外*, 2007, 37(3): 259-261.
- [21] Zhang Z X, Jiang Z W, Peng J G, *et al.* Fabrication and characterization of Er³⁺:Yb³⁺ co-doped phosphosilicate fibers [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2012, 27(5): 485-488.
张泽学, 蒋作文, 彭景刚, 等. 钕铒共掺磷硅酸盐光纤的制备及其激光性能研究 [J]. *无机材料学报*, 2012, 27(5): 485-488.
- [22] Steinke M, Croteau A, Paré C, *et al.* Co-seeded Er³⁺:Yb³⁺ single frequency fiber amplifier with 60 W output power and over 90% TEM₀₀ content [J]. *Optics Express*, 2014, 22(14): 16722-16730.
- [23] Khudyakov M M, Lobanov A S, Lipatov D S, *et al.* Single-mode large-mode-area Er-Yb fibers with core based on phosphorosilicate glass highly doped with fluorine [J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(2): 025105.
- [24] Snitzer E, Po H, Hakimi F, *et al.* Erbium fiber laser amplifier at 1.55 μm with pump at 1.49 μm and Yb sensitized Er oscillator [C] // *Optical Fiber Communication*, January 25, 1988, New Orleans, Louisiana, United States. Washington, D.C.: OSA, 1988: PD2.
- [25] Minelly J D, Barnes W L, Laming R I, *et al.* Diode-array pumping of Er³⁺/Yb³⁺ co-doped fiber lasers and amplifiers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(3): 301-303.
- [26] Sahu J K, Jeong Y, Richardson D J, *et al.* A 103 W erbium-ytterbium co-doped large-core fiber laser [J].

- Optics Communications, 2003, 227 (1/2/3): 159-163.
- [27] Jebali M A, Maran J N, LaRochelle S. 264 W output power at 1585 nm in Er-Yb codoped fiber laser using in-band pumping[J]. Optics Letters, 2014, 39(13): 3974-3977.
- [28] Zhan S B, Zhao S H, Dong S F, *et al.* The experimental study of the Er³⁺/Yb³⁺ co-doped double clad fiber laser[J]. Laser Technology, 2003, 27(6): 606-608.
占生宝, 赵尚弘, 董淑福, 等. 双包层 Er³⁺/Yb³⁺ 共掺光纤激光器的实验研究[J]. 激光技术, 2003, 27(6): 606-608.
- [29] Chen W T. Theoretical and experimental study on high power erbium-ytterbium co-doped fiber laser and superfluorescence output [D]. Shanghai: Fudan University, 2013: 15-19.
陈文婷. 高功率铒镱共掺光纤激光和超荧光输出的理论和实验研究[D]. 上海: 复旦大学, 2013: 15-19.
- [30] Jeong Y, Sahu J K, Richardson D J, *et al.* Seeded erbium/ytterbium codoped fibre amplifier source with 87 W of single-frequency output power [J]. Electronics Letters, 2003, 39(24): 1717-1719.
- [31] 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 [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9728: 97282L.
- [32] Alegria C, Jeong Y, Codemard C, *et al.* 83-W single-frequency narrow-linewidth MOPA using large-core erbium-ytterbium co-doped fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(8): 1825-1827.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] Hu Y, Jiang S, Luo T, *et al.* Performance of high-concentration Er³⁺-Yb³⁺ codoped phosphate fiber amplifiers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(7): 657-659.
- [36] Xu S H, Yang Z M, Feng Z M, *et al.* Efficient fibre amplifiers based on a highly Er³⁺/Yb³⁺ codoped phosphate glass-fibre [J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(4): 047806.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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): 7103106.
- [40] Tang X Y, Han Q, Song H L, *et al.* Numerical investigation of the thermal effect on Yb-cavity-copumped Er/Yb codoped fiber amplifiers [J]. Applied Optics, 2018, 57(7): 1541-1547.
- [41] Du X Y, Su R T, Wang X L, *et al.* Research on fiber laser performance working at different temperatures [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(s1): s102004.
杜雪原, 粟荣涛, 王小林, 等. 工作温度对光纤激光器输出特性的影响研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(s1): s102004.
- [42] Yang C S, Guan X C, Zhao Q L, *et al.* High-power and near-shot-noise-limited intensity noise all-fiber single-frequency 1.5 μm MOPA laser [J]. Optics Express, 2017, 25(12): 13324-13331.
- [43] Hu Z T, He B, Zhou J, *et al.* Research progress in thermal effect of high power fiber lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(8): 080002.
胡志涛, 何兵, 周军, 等. 高功率光纤激光器热效应的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8): 080002.
- [44] Zheng Y, Li P, Zhu Z D, *et al.* Progress in high-power narrow-linewidth fiber lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 080002.
郑也, 李磐, 朱占达, 等. 高功率窄线宽光纤激光器研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 080002.
- [45] Mermelstein M, Yablon A D. Suppression of stimulated Brillouin scattering (SBS) in high power fiber amplifier: US7733561 [P/OL]. 2007-01-25 [2019-06-12]. <http://www.google.co.in/patents/US7733561>.
- [46] Kuhn V, Weßels P, Neumann J, *et al.* Stabilization and power scaling of cladding pumped Er:Yb-codoped fiber amplifier via auxiliary signal at 1064 nm [J].

- Optics Express, 2009, 17(20): 18304-18311.
- [47] Robin T, Gotter T, Barnini A, *et al.* Evidence of photo-darkening in co-doped erbium-ytterbium double-clad fibers operated at high-output power[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10528: 1052815.
- [48] Shirakawa A, Suzuki H, Tanisho M, *et al.* Yb-ASE-free Er amplification in short-wavelength filtered Er: Yb photonic-crystal fiber [C] // Optical Fiber Communication Conference 2008, February 24-28, 2008, San Diego, California, United States. Washington, D.C.: Optical Society of America, 2008: OthN2.
- [49] Ouyang D Q, Guo C Y, Ruan S C, *et al.* Yb band parasitic lasing suppression in Er/Yb-co-doped pulsed fiber amplifier based on all-solid photonic bandgap fiber[J]. Applied Physics B, 2014, 114(4): 585-590.
- [50] Limongelli J R, Setzler S D, Creeden D. Experimental and numerical analysis of high power Er:Yb co-doped fiber amplifiers[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10083: 100831O.
- [51] Booker P, Caspary R, Neumann J, *et al.* Pump wavelength dependence of ASE and SBS in single-frequency EYDFAs [J]. Optics Letters, 2018, 43(19): 4647-4650.
- [52] Han Q, Ning J P, Sheng Z X. Numerical investigation of the ASE and power scaling of cladding-pumped Er-Yb codoped fiber amplifiers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(11): 1535-1541.
- [53] Sobon G, Kaczmarek P, Antonczak A, *et al.* Controlling the 1 μm spontaneous emission in Er/Yb co-doped fiber amplifiers [J]. Optics Express, 2011, 19(20): 19104-19113.
- [54] Sobon G, Sliwinska D, Abramski K M, *et al.* 10 W single-mode Er/Yb co-doped all-fiber amplifier with suppressed Yb-ASE [J]. Laser Physics Letters, 2014, 11(2): 025103.
- [55] Han Q, Yao Y Z, Chen Y F, *et al.* Highly efficient Er/Yb-codoped fiber amplifier with an Yb-band fiber Bragg grating [J]. Optics Letters, 2015, 40(11): 2634-2636.
- [56] Han Q, Yan W C, Yao Y Z, *et al.* Optimal design of Er/Yb co-doped fiber amplifiers with an Yb-band fiber Bragg grating[J]. Photonics Research, 2016, 4(2): 53-56.
- [57] Zhao X R, Han Q, Wang D, *et al.* Optimal design of high-power cascade co-pumping Er/Yb-codoped fiber lasers[J]. Optics Letters, 2019, 44(5): 1100-1103.
- [58] Han Q, Yao Y Z, Tang X Y, *et al.* Highly efficient Er-Yb codoped double-clad fiber amplifier with an Yb-band resonant cavity[J]. Laser Physics Letters, 2017, 14(2): 025105.