

引用格式: WANG Dan, HAN Qun, NIU Panpan, et al. Experimental Research on High Power Cascade Co-pumping Erbium-Ytterbium Co-doped Fiber Laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(6):0614001

王丹,韩群,钮盼盼,等. 辅腔泵浦高功率铒镱共掺光纤激光器实验研究[J].光子学报,2021,50(6):0614001

# 辅腔泵浦高功率铒镱共掺光纤激光器实验研究

王丹,韩群,钮盼盼,刘铁根

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术教育部重点实验室,天津 300072)

**摘 要:** 铒镱共掺光纤激光器的功率提高主要受热效应和镱波段放大的自发辐射的限制。为了提高铒镱共掺光纤激光器的输出功率,设计了液冷散热结构并采用辅腔泵浦法进行实验研究。结果表明,采用 2.1 m 长的大模面积铒镱共掺双包层光纤时,在 47.5 W 的泵浦功率下得到了波长为 1 548.9 nm、最高功率为 21.6 W 的输出,综合泵浦转化效率为 45.7%;辅助腔中镱波段振荡建立前后的斜率效率分别为 48.4% 和 56.2%。

**关键词:** 高功率光纤激光器;铒镱共掺;辅腔泵浦法;Yb-ASE;热效应

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20215006.0614001

## Experimental Research on High Power Cascade Co-pumping Erbium-Ytterbium Co-doped Fiber Laser

WANG Dan, HAN Qun, NIU Panpan, LIU Tiegeng

(Key Laboratory of Optoelectronics Information Science and Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** The amplified spontaneous emission in the Yb band and thermal effect are the main obstacles to the power scaling of high-power Er/Yb-codoped fiber lasers. In order to obtain a high-power and high-efficiency fiber laser, a liquid cooling structure and the cascade co-pumping method are used to carry out experimental research on the erbium-ytterbium co-doped fiber laser. The results show that by using a 2.1 m large core diameter erbium-ytterbium co-doped fiber, a maximum output of 21.6 W at 1 548.9 nm is obtained with a pump power of 47.5 W, and the pump conversion efficiency is 45.7%. The slope efficiency before and after the Yb band oscillation is established are 48.4% and 56.2%, respectively.

**Key words:** High power fiber laser; Erbium-Ytterbium co-doping; Cascade co-pumping method; Yb-ASE; Thermal effect

**OCIS Codes:** 140.3460; 140.3510; 140.3500; 140.3615

## 0 引言

1.5  $\mu\text{m}$  波段的高功率光纤激光器具有对人眼安全、在大气和光纤中传输损耗低等优点,在空间通信、激光雷达、测距和遥感等系统中具有重要的应用价值<sup>[1-3]</sup>。该波段光纤激光器的增益介质通常为双包层铒镱共掺光纤(Erbium-Ytterbium Co-doped Fiber, EYDF)。现有研究表明,高功率铒镱共掺光纤激光器(Erbium-Ytterbium Co-doped Fiber Laser, EYDFL)的功率提升主要受到两个因素限制:一是镱波段放大自发辐射(Yb-band Amplified Spontaneous Emission, Yb-ASE),由镱离子到铒离子的能量转移瓶颈效应引起<sup>[4]</sup>,强烈

基金项目:天津市自然科学基金(No.18JCYBJC17000)

第一作者:王丹(1996—),女,硕士研究生,主要研究方向为铒镱共掺光纤激光器。Email: wangdan1@tju.edu.cn

导师(通讯作者):韩群(1977—),男,副教授,博士,主要研究方向为光纤激光器、光纤传感技术。Email: hanqun@tju.edu.cn

收稿日期:2020-12-17;录用日期:2021-02-04

<http://www.photon.ac.cn>

的Yb-ASE效应会降低激光器效率甚至损坏光纤器件<sup>[5-6]</sup>;二是热效应,光纤中严重的热效应会影响掺杂离子的吸收/发射截面并导致热透镜等效应,从而降低激光器性能甚至造成永久性破坏<sup>[7-9]</sup>。

目前抑制Yb-ASE的方法主要有两类,一是选择性损耗法。该方法一般用特制的长周期光纤光栅<sup>[10]</sup>或光子晶体光纤<sup>[11]</sup>过滤Yb-ASE来提高寄生振荡阈值。由于并未从根本上抑制Yb-ASE的产生,高功率时寄生振荡依然存在。二是改变泵浦方式,如非峰值泵浦法<sup>[12-15]</sup>,基于掺镱光纤激光器(Ytterbium Doped Fiber Laser, YDFL)的纤芯泵浦法<sup>[16]</sup>以及辅助信号或辅腔泵浦法<sup>[17-22]</sup>。克莱姆森大学的DONG Liang等采用非峰值泵浦法在1 562.6 nm处获得了302 W的输出,这是目前该波段EYDFL的最高输出功率<sup>[12]</sup>。该方法用非峰值吸收的泵浦波长提高Yb-ASE阈值,但需要延长增益光纤以保证泵浦吸收,不利于抑制受激布里渊散射和输出光信噪比<sup>[23]</sup>,且Yb-ASE问题在高功率时依然不可避免<sup>[14, 21]</sup>。与非峰值泵浦法类似,基于YDFL的纤芯泵浦法在高功率时同样存在Yb-ASE问题,且在输出端可能会出现较多的剩余泵光<sup>[16]</sup>。辅助信号法通过辅助信号的受激放大将反向Yb-ASE带到泵浦同向,避免了镱波段自激振荡并减弱了后向反馈,利于构建全光纤系统,但也需要大幅延长增益光纤以充分吸收辅助信号<sup>[22]</sup>。辅腔泵浦法引入一个镱波段的高Q值辅助谐振腔,腔内的镱波段振荡能抑制Yb-ASE并形成二次泵浦以提高泵浦转化效率(Pump Conversion Efficiency, PCE),增益光纤长度也可得到控制<sup>[18, 20]</sup>。因此其功率提升不再受Yb-ASE的限制,该方法可将泵浦功率提高至光纤热损伤阈值。

对于热效应,目前主要有优化增益光纤参数和泵浦结构<sup>[24-25]</sup>、选择合适的泵浦波长<sup>[16]</sup>和设计主动散热结构<sup>[26-27]</sup>三种方法。主动散热结构是目前广为采用的热管理方案。

为获得高功率高效率的EYDFL,本文采用辅腔泵浦法并结合主动散热结构,对全光纤辅腔泵浦EYDFL进行了实验研究。实验中采用2.1 m的大模面积双包层EYDF,在泵浦功率为47.5 W时得到了21.6 W的输出,PCE为45.7%。镱波段起振前后的斜率效率分别为48.4%和56.2%。实验中增益光纤涂覆层最高温度为45.8 °C,远低于光纤热损伤阈值温度80 °C。输出功率可通过提高泵浦功率进一步提升。

## 1 实验装置

辅腔泵浦EYDFL的实验装置如图1所示。实验中采用前向包层泵浦方式,泵浦光依次通过泵浦合束器,铒波段以及镱波段的高反射率光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)耦合到2.1 m长的双包层增益光纤中。增益光纤缠绕在自主设计的液冷散热结构上。该结构与水冷机相连,通过水冷机控制流动水的温度为17 °C,并使水流上进下出来进行散热,水冷机温控精度为3 °C。铒波段谐振腔由一个1 550 nm的高反FBG和4%的端面反射构成。辅腔由一对波长为1 018 nm的高反射率FBG构成,该波长是根据文献[20]中的方法通过数值优化确定的。激光器的输出功率由功率计测得。

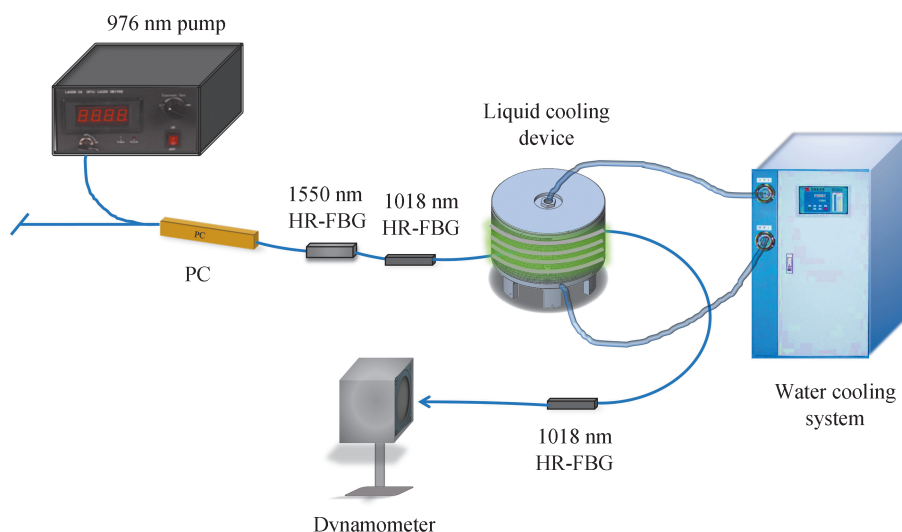


图1 高功率辅腔泵浦EYDFL实验装置

Fig. 1 Experimental setups of the high-power cascade co-pumping EYDFL

实验中使用的泵浦源的中心波长为 976.2 nm,光谱宽度为 0.5 nm,最高输出功率为 53 W。考虑到熔接点的损耗,入纤最高泵浦功率约 47.5 W。钕和镱波段的 FBG 均刻写在双包层大芯径多模光纤 DCF-UN-25/250-10 上,其透射谱如图 2 所示。钕波段高反 FBG 的峰值波长在 1 550.8 nm,反射率为 99.8%。一对镱波段 FBG 中心波长在 1 017.5 nm,反射率均 >99%。增益光纤是 CorActive 公司生产的双包层钕镱共掺光纤 DCF-EY-28/250。

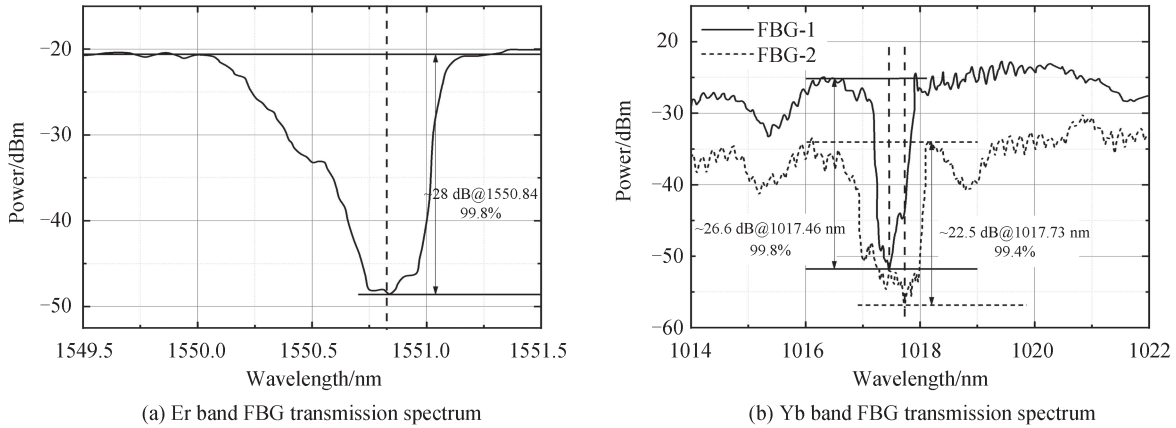
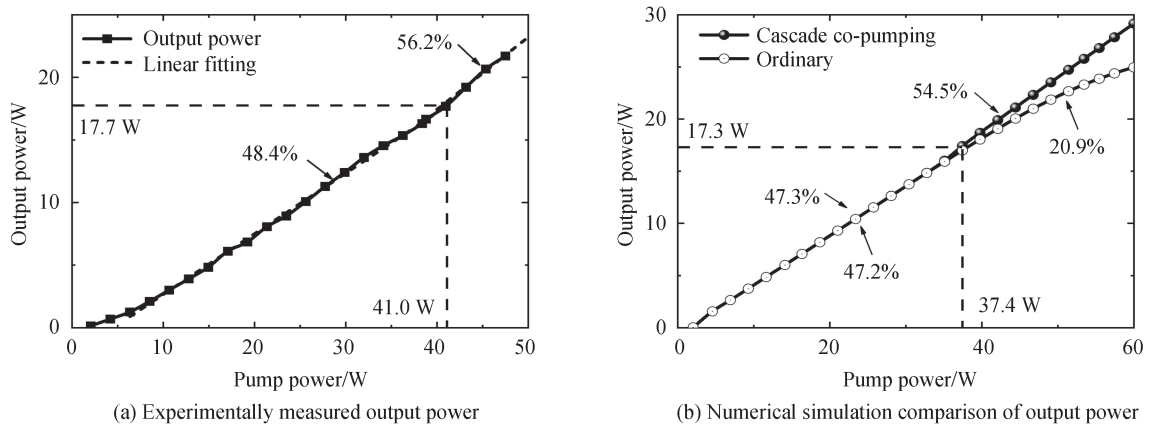


图 2 实验中使用的 FBG 透射谱  
Fig. 2 FBG transmission spectrum used in the experiment

## 2 实验结果分析与讨论

### 2.1 激光器的功率特性

图 3(a)和(c)分别为辅腔泵浦 EYDFL 的输出功率和泵浦转化效率与入纤泵浦功率的关系,图 3(b)和(d)为对应的辅腔泵浦 EYDFL 和普通 EYDFL 的模拟结果<sup>[8, 17, 21]</sup>。由图 3(a)可以看出,实验中激光器刚起振时斜率效率较低,这是由于泵浦源的波长在驱动电流较低时还未锁定在 976 nm。随着泵浦功率的升高输出功率持续增长并获得了最高 21.6 W 的输出功率。Yb 波段谐振腔在泵浦功率约为 41.0 W 时起振,起振前斜率效率为 48.4%,起振后提高到了 56.2%。图 3(b)中的仿真结果与实验趋势基本一致。可以看出,高功率泵浦时辅腔泵浦 EYDFL 相比于普通 EYDFL 有明显的优势,辅腔起振后,斜率效率会有所提高,而普通 EYDFL 中由于 Yb-ASE 的不断增强,斜率效率随泵浦功率的提高不断下降,出现了明显的饱和趋势。由图 3(c)和(d)可以看出,从镱波段起振点到最高泵浦功率 47.5 W,辅腔泵浦 EYDFL 的 PCE 增加了约 2.5% 而普通 EYDFL 的 PCE 明显下降。综上,辅腔泵浦法能够有效解决高功率 EYDFL 中的 Yb-ASE 问题,显著提高斜率效率和泵浦转化效率。



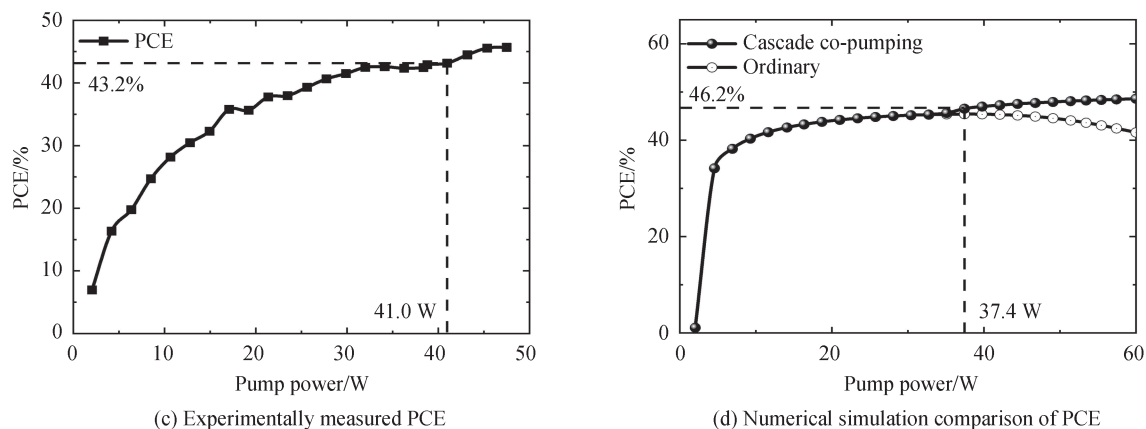
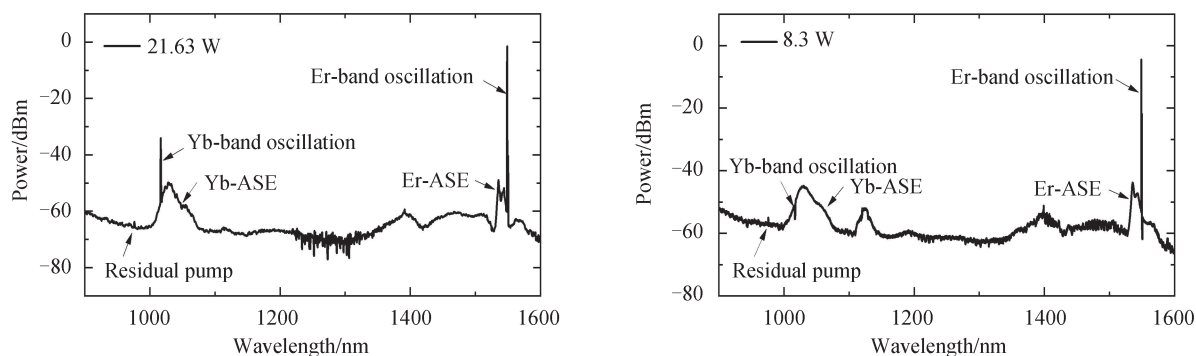


图3 实验测量的高功率辅腔泵浦EYDFL的输出特性以及与普通泵浦法的数值仿真对比

Fig. 3 Experimental measurement of the output characteristics of high-power cascade co-pumping EYDFL and numerical simulation comparison with the ordinary pumping EYDFL

## 2.2 激光器的光谱特性

图4展示了输出功率分别为21.6 W和8.3 W时,光谱仪测得的辅腔泵浦EYDFL 900~1 600 nm的后向输出光谱。激光器输出波长为1 548.9 nm。对比图4(a)和(b)可以看出镜波段光谱起振前后变化较大。输出功率为8.3 W时,在1 017 nm处有由于镜波段高反射率FBG而出现的凹陷,此时镜波段并未起振,激光输出相对于Yb-ASE的信噪比40.3 dB。镜波段起振后,可以看到在1 017 nm处显著的镜波段振荡峰值, Yb-ASE相对于激光输出的信噪比为48.8 dB,比起振前信噪比提高8.5 dB。这表明高功率时辅腔泵浦法可以抑制Yb-ASE并有利于改善激光器的光信噪比。



(a) Output power is 21.6 W (after Yb band oscillation is established) (b) Output power is 8.3 W (before Yb band oscillation is established)

图4 EYDFL的后向光谱图

Fig. 4 The backward spectra of the EYDFL

## 2.3 激光器的热效应分析

辅腔泵浦EYDFL的高Q值辅腔中形成的强烈的Yb波段振荡会带来额外的热积累。为避免热损伤,实验中采取水冷主动散热,并用红外热像仪对增益光纤温度最高点处的温度进行了监测。实验中将增益光纤缠绕在水冷散热结构的精密U型槽中进行散热。图5是实验以及数值仿真的辅腔泵浦EYDFL增益光纤涂覆层最高温度随泵浦功率的变化。理论仿真中散热系数 $H=1\ 000\ \text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})^{[8]}$ 。从图中可以看出,随着泵浦功率的提高,增益光纤的温度同步升高,但在辅腔起振的阈值附近出现向下的突变。实验结果与理论预期趋势一致,曲线间的差别主要是由于实验中水冷机温控精度较低造成的。该趋势说明,在同样的泵浦功率下,辅腔的起振是有助于减轻最热点的温度的。这是由于辅腔起振后,有较多泵浦能量被转化为辅腔中的激光,一定程度上有利于降低泵浦端的瓶颈效应。在泵浦源的整个功率范围内,增益光纤涂覆层最高温度45.8℃,远低于光纤涂覆层的损伤温度80.0℃,体现了良好的热管理效果。如果进一步提高泵浦功率,输出功率应还可继续提高。



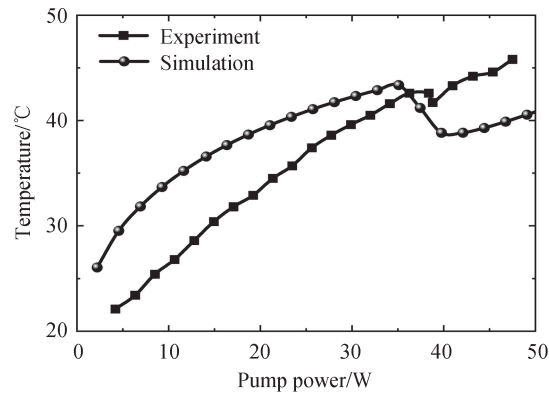


图5 增益光纤涂覆层最高温度随泵浦功率的变化

Fig. 5 Maximum temperature of the gain fiber coating varies with the pump power

### 3 结论

本文对辅腔泵浦EYDFL进行了实验研究。采用自主设计的水冷结构对增益光纤进行热管理。在最高47.5 W的泵浦功率下得到了21.6 W的1548.9 nm的高功率输出。实验结果表明,辅腔泵浦能有效抑制高功率EYDFL中的Yb-ASE,在高功率泵浦时能显著提高斜率效率和泵浦转化效率,是获得高功率高效率EYDFL的有效手段。进一步改善实验条件,如提高泵浦功率,优化光纤参数、FBG参数和热管理,输出功率还可以继续提高。

#### 参考文献

- [1] CODEMARD C, PHILIPPOV V, YOONCHANJEONG. High-energy in-fiber pulse amplification for coherent lidar applications [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(22): 2590-2592.
- [2] CODEMARD C, FARRELL C, DUPRIEZ P, et al. Millijoule, high-peak power, narrow-linewidth, sub-hundred nanosecond pulsed fibre Master-Oscillator Power-Amplifier at 1.55  $\mu\text{m}$  [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2006, 7(2): 170-176.
- [3] DOLFI BOUTEYRE A, CANAT G, VALLA M, et al. Pulsed 1.5  $\mu\text{m}$  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.
- [4] KOBAYASHI Y, SEKIYA E H, BANNO M, et al. Effect of P-to-rare earth atomic ratio on energy transfer in Er-Yb-doped optical fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(16): 4504-4512.
- [5] 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.
- [6] DONG Liang, MATNIYAZ T, KALICHEVSKY-DONG M T, et al. Modeling Er/Yb fiber lasers at high powers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(11): 16244-16255.
- [7] MORASSE B, AGGER S, HOVINGTON C, et al. 10W ASE-free single-mode high-power double-cladding Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup> amplifier[C]. *SPIE*, 2007, 6453: 24-28.
- [8] TANG Xiaoyun, HAN Qun, SONG Huiling, 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.
- [9] TANG Xiaoyun, HAN Qun, ZHAO Xueru, et al. Method for estimating the Stark splitting of rare-earth ions from the measured cross-section spectra [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(29): 8573-8577.
- [10] YUSIM A, BARSALOU J, GAPONTSEV D, et al. 100 watt single-mode CW linearly polarized all-fiber format 1.56- $\mu\text{m}$  laser with suppression of parasitic lasing effects[C]. *SPIE*, 2005, 5709: 69-77.
- [11] SHIRAKAWA A, SUZUKI H, TANISHO M, et al. Yb-ASE-free Er amplification in short-wavelength filtered Er:Yb photonic-crystal fiber [C]. *Proceedings of the Conference on Optical Fiber Communications/National Fiber Optic Engineers Conference*, 2008: 1966-1968.
- [12] MATNIYAZ T, KONG Fanting, KALICHEVSKY-DONG M T, et al. Record 302W single-mode power from an Er/Yb fiber MOPA [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(10): 2910-2913.
- [13] CREEDEN D, PRETORIUS H, LIMONGELLI J, et al. Single frequency 1560nm Er:Yb fiber amplifier with 207W output power and 50.5% slope efficiency[C]. *Proceedings of the Conference on Fiber Lasers XIII -Technology, Systems, and Applications*, 2016, 9728:92782L.

- [14] DE VARONA O, FITTKAU W, BOOKER P, et al. Single-frequency fiber amplifier at 1.5  $\mu\text{m}$  with 100 W in the linearly-polarized TEM<sub>00</sub> mode for next-generation gravitational wave detectors [J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 24880-24892.
- [15] WANG Shang, LIU Zhaojun, ZHAO Zhigang, 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.
- [16] DE VARONA O, STEINKE M, NEUMANN J, et al. All-fiber, single-frequency, and single-mode Er<sup>3+</sup>:Yb<sup>3+</sup> fiber amplifier at 1556nm core-pumped at 1018nm [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(11): 2632-2635.
- [17] HAN Qun, NING Jiping, ZHANG Weiyi, et al. ASE suppression method for high power pumped Er-Yb co-doped fiber amplifiers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 29(12): 252-257.  
韩群, 宁继平, 张伟毅, 等. 高功率抽运钇镱共掺光纤放大器中放大自发辐射抑制方法的研究[J]. *光子学报*, 2009, 29(12): 252-257.
- [18] HAN Qun, YAO Yunzhi, TANG Xiaoyun, 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.
- [19] HAN Qun, YAN Wenchuan, YAO Yunzhi, 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.
- [20] ZHAO Xueru, HAN Qun, WANG Dan, et al. Optimal design of high-power cascade co-pumping Er/Yb-codoped fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(5): 1100-1103.
- [21] HAN Qun, NING Jiping, SHENG Zhaoxia. 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.
- [22] STEINKE M, CROTEAU A, PARÉ C, et al. Co-seeded Er<sup>3+</sup>:Yb<sup>3+</sup> single frequency fiber amplifier with 60 W output power and over 90% TEM(00) content [J]. *Optics Express*, 2014, 22(14): 16722-16730.
- [23] BOOKER P, DE VARONA O, WESSELS P, et al. Numerical investigations of off-resonant pumped Er<sup>3+</sup>:Yb<sup>3+</sup> codoped fibre amplifiers [C]. *Proceedings of the 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*, 2017.
- [24] XUE Dong, ZHOU Jun, LOU Qihong, et al. Thermal effect and power limit in high power double-clad fiber laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(7): 1013-1018.  
薛冬, 周军, 楼祺洪, 等. 高功率双包层光纤激光器热效应及功率极限[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(7): 1013-1018.
- [25] WANG Yong, XU Changqing, PO Hong. Thermal effects in kilowatt fiber lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(1): 63-65.
- [26] ZINTZEN B, LANGER T, GEIGER J, et al. Heat transport in solid and air-clad fibers for high-power fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 16787-16793.
- [27] DAWSON J W, MESSERLY M J, BEACH R J, et al. Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.