

单频 EYDFA 中种子光功率和增益光纤温度对输出线宽的影响

白晓磊^{1,2}, 盛泉^{1,2}, 张海伟^{1,2}, 付士杰^{1,2}, 史伟^{1,2}, 姚建铨^{1,2}

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

摘要: 针对单频激光在放大过程中线宽展宽的问题, 对 1 550 nm 单频铒镱共掺光纤放大器 (EYDFA) 中种子光功率和温度对输出线宽的影响进行了实验研究。实验对比了不同种子光功率、增益光纤温度下, 放大后线宽的变化情况。实验结果表明, 获得相同输出功率时, 提高的种子光功率会增加输出信噪比 (SNR), 并降低放大后线宽展宽的程度。当种子光功率确定时, 增益光纤温度也会影响输出线宽。在相同泵浦功率下, 增益光纤温度上升会提高放大器的效率和增加受激自发辐射 (ASE) 强度, 但会使输出线宽的展宽增加。同时, 分析了种子光功率和温度影响 EYDFA 输出线宽的原因, 认为 ASE 是影响线宽展宽特性的原因之一。

关键词: 铒镱共掺光纤放大器; 单频; 受激自发辐射; 线宽

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1005004

Influence of seed power and gain fiber temperature on output linewidth in single-frequency EYDFA

Bai Xiaolei^{1,2}, Sheng Quan^{1,2}, Zhang Haiwei^{1,2}, Fu Shijie^{1,2}, Shi Wei^{1,2}, Yao Jianquan^{1,2}

- (1. College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Key Laboratory of Opto-electronics Information Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Based on the 1 550 nm single-frequency Erbium-Ytterbium co-doped fiber amplifier (EYDFA), the linewidth broadening with different seed powers and gain fiber temperatures was experimentally investigated. The results demonstrate that, to obtain the same output power, the increase of the seed power was beneficial to improve the output signal to noise ratio (SNR), and to reduce the linewidth broadening. The increase of gain fiber temperature can improve slope efficiency and enhance the amplified spontaneous emission (ASE) intensity but broaden linewidth. Meanwhile, the reason of linewidth broadening was discussed and the ASE was considered as one of the reason of linewidth variation.

Key words: Erbium-Ytterbium co-doped fiber amplifier; single frequency; ASE; linewidth

收稿日期: 2018-05-05; 修订日期: 2018-06-03

基金项目: 国家重点研究和发展项目 (2016YFB0402204); 国家自然科学基金 (61335013, 61275102)

作者简介: 白晓磊 (1986-), 男, 博士生, 主要从事光纤激光器方面的研究。Email: baixiaolei@tju.edu.cn

导师简介: 史伟 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高性能大功率光纤激光器、非线性光学和太赫兹光子学方面的研究。

Email: shiwei@tju.edu.cn

0 引言

单频光纤激光器由于其具有极窄线宽、低噪声的等特点,在医疗、空间探索、相干通信、非线性频率变换等领域得到广泛的应用,是当前研究的热点。其中,工作波长为 $1.5\ \mu\text{m}$ 的单频激光又由于具有“人眼安全”和低光纤传输损耗的特性而被广泛关注^[1-3]。目前,以铒镱共掺光纤为增益质的主振荡功率放大器(MOPA),是获得高功率单频 $1.5\ \mu\text{m}$ 激光的最有效手段^[4-5]。2005年,Jeong Y等人利用铒镱共掺光纤搭建的MOPA,获得了功率 151 W 的 $1.5\ \mu\text{m}$ 单频激光输出,输出线宽约 1 MHz^[6]。在单频激光器的众多指标中,输出激光线宽是单频光纤激光器的最重要指标。输出光谱的宽度决定了激光的相干长度,直接影响单频激光的应用价值。近些年研究发现,通过MOPA系统获得高功率单频激光的过程中,信号光线宽会出现不同程度的展宽,特别在高功率放大过程中,光谱展宽的现象尤为明显^[5]。1990年,Cowle等人首次对光纤放大器线宽特性进行了研究,观察到了放大后线宽展宽的现象^[7]。2013年,Yang等人报道了最大输出功率 10.9 W 的单级铒镱共掺全光纤MOPA。实验中,信号光线宽从 2 kHz 展宽到 3.5 kHz^[8]。2015年,笔者所在课题组通过全光纤铒镱共掺MOPA系统放大 700 Hz 单频种子信号,获得了 56.4 W 高功率 1 550 nm 单频激光输出,放大过程中也观察到明显的线宽展宽现象^[9]。

激光放大过程中线宽展宽的原因一直在探讨中。一般认为,放大器中的相位噪声是导致线宽展宽的原因之一^[6]。但 1998年,Moller等人通过实验,在放大过程中加入附加相位噪声,发现相位噪声导致的线宽展宽量小于 10 Hz^[10]。2013年,Iolanda R等人通过实验进一步证明,相位噪声与放大器的增益无关,且放大过程中的相位噪声不会明显影响最后的输出光谱宽度^[11]。也有文献报道认为,线宽展宽的原因是弛豫振荡引起的自相位调制^[5]。另外,2001年,Rochat等人从理论上预测,放大过程中产生的 ASE 作为噪声,也会影响输出线宽,但没有进一步的实验验证^[12]。

影响单频 MOPA 输出激光线宽特性的因素较复杂,一方面,输出线宽是由种子源(MO)的输出线宽决定的。由于受外界环境的影响,如温度变化、振

动、泵浦电流的波动等,会导致种子源谐振腔长度变化,引起种子源线宽展宽或者漂移。另一方面,MOPA 中功率放大器(PA)的工作状态,如泵浦源波长波动、增益光纤的温度、增益光纤内的噪声情况等,也会对输出线宽产生明显的影响。

文中主要针对 MOPA 中功率放大器中种子光功率、增益光纤温度对输出线宽的影响进行实验研究。种子光功率方面,实验对比研究了单频光纤放大器放大不同功率的种子光,在获得相同输出时,输出线宽的变化情况。在温度方面,对比了增益光纤温度不同引起的放大效率和线宽的变化情况,探讨影响单频光纤放大器输出线宽的原因。实验结果表明:种子光功率会影响放大器的增益,增益光纤的温度会影响其对泵浦光的吸收效率,两者都会影响放大器输出光中 ASE 强度,且 ASE 强度与光谱宽度变化趋势一致。ASE 是光谱中的非相干成分,其功率的强弱(信噪比)体现出输出光中的相干成分比例,认为放大过程中产生的 ASE 是影响输出线宽的因素之一。

1 实验结构

实验结构如图 1 所示。种子源为波长 1 549.9 nm 单频光纤激光器,最大输出功率 30 mW,输出激光线宽 700 Hz。种子源输出端熔接有保偏隔离器(ISO)防止反向光进入种子源引起损伤。波长为 976 nm 的半导体激光器(LD)作为泵浦源,通过(2+1)×1 光纤合束器与种子光耦合进入增益光纤。该实验中所用的增益光纤为 Nufem 公司生产的保偏 Er/Yb 共掺双包层光纤(Nufem, PM-EYDF-12/130),纤芯直径 $12\ \mu\text{m}$,内包层直径 $130\ \mu\text{m}$,光纤长度为 2 m,测得该光纤对 976 nm 泵浦光的吸收系数为 4 dB/m。增益光纤放置于金属热沉上,由半导体致冷器 TEC 控制热沉温度,控制精度 $\pm 0.5\ \text{C}$ 。增益光纤末端连接包层模剥离器(CMS)用于去除未被吸收的泵浦光。系统输出端光纤切斜 8° 防止反射。

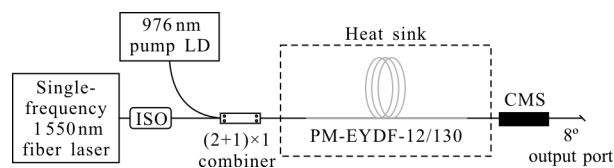


图 1 单频 EYDFA 实验结构示意图

Fig.1 Experimental setup of single-frequency EYDFA

2 实验结果和讨论

2.1 种子光功率对线宽的影响

种子光功率的大小直接影响放大器的效率。在获得相同输出功率时, 种子光功率的变化会改变输出光 ASE 强度。为了单独研究种子光功率对线宽的影响, 在选择不同种子光功率的同时调节泵浦功率, 使输出功率保持相等, 避免功率因素对线宽的影响。如图 2 所示为不同种子光功率下, 热沉温度为 25 °C 时, 放大器输出光与泵浦光之间的功率关系曲线。当种子光功率为 10、20、30 mW 时, 放大器对应的输出斜率效率分别为 15.7%、18.4% 和 20.1%。通过结果可以看出: 随着种子光功率的增加, 种子光对上能级粒子提取效率增加, 放大器斜率效率上升。同时, 放大器斜率效率的上升, 会降低 ASE 强度。在种子光功率分别为 10、20、30 mW 时, 调节泵浦光功率, 控制输出总功率为 1 W 和 2 W, 利用光谱仪(Yokogawa, AQ6375)记录的输出光谱图, 如图 3(a)和(b)所示。图中可以看出, 输出信号光信噪比大于 40 dB, ASE 功率主要集中在 1 530~1 545 nm 附近。随种子光功率的上升, ASE 功率明显下降, 信噪比不断上升。当输出功率为 1 W 时, 种子光功率从 10 mW 提高到 30 mW, 1 530~1 545 nm 波段的 ASE 的功率下降约 6 dB, 如图 3(a)所示。当输出功率为 2 W 时, 由于种子光功率上升导致的 ASE 功率下降更明显, 最大的 ASE 功率下降波长在 1 535 nm, 下降了 9 dB, 如图 3(b)所示。分析其原因为种子光功率上升提高了对反转上能级粒子数的提取效率, 泵浦能量主要向信号光转换, 因此 ASE 功率下降, 信噪比提高。较高的泵浦功率时, 这种由于种子光功率引起的 ASE 强度变化更加明显。

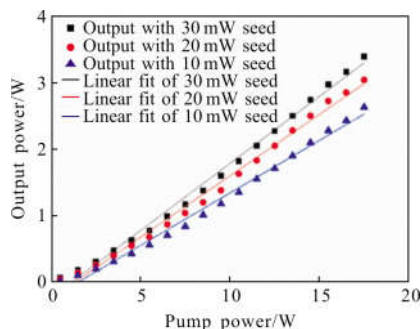


图 2 不同种子光功率下, 输出功率和泵浦功率之间的关系曲线
Fig.2 Output power versus pump power with different seed powers

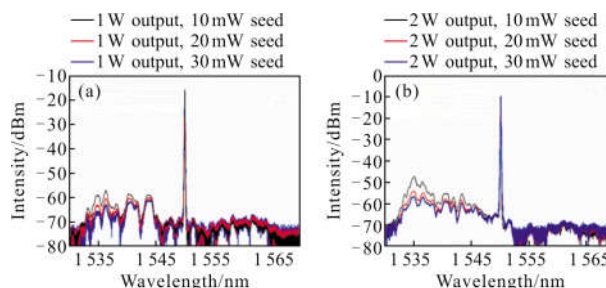


图 3 不同种子光功率下, 输出功率分别为 1 W(a)、2 W(b)时的输出光谱图

Fig.3 Output spectra with different seed powers at 1 W (a) and 2 W (b) output power

对不同种子光功率时, 放大输出线宽的变化情况进行测量并对比研究。采用延时自外差法(DSH)对输出线宽进行测量。测量系统由中心频率为 70 MHz 的声光调制器(AOM)、50 km 光纤延迟线、InGaAs 光电探测器 (Thorlabs, DET01CFC) 和频谱分析仪 (Agilent, N9020A)组成。控制输出总功率为 1 W 和 2 W 时, 测量不同种子光功率放大后输出线宽, 得到的频谱线型图如图 4(a)所示。对图 4(a)中的频谱图进行洛伦兹拟合, 可以计算出输出激光线宽, 线宽随种子光功率变化情况如图 4(b)所示。一方面, 种子光经过放大后, 其输出线宽有不同程度的展宽。图 4(b)中, 当种子光功率为 30 mW 时, 输出功率为 1 W 时的输出线宽为 0.76 kHz, 与种子光线宽基本相等。继续提高输出功率到 2 W 时, 输出线宽展宽到 0.94 kHz。另一方面, 种子光功率越高, 放大后的线宽展宽越少。当放大器输出 1 W 时, 种子光功率从 10 mW 增加到 30 mW, 输出线宽会从 0.89 kHz 近似线性下降到 0.76 kHz。总输出功率为 2 W 时, 种子光功率提高, 输出线宽同样从 1.02 kHz 下降到 0.94 kHz。通过与对应条件下测得的输出光谱图进行对比, 可以看出, 提高种子光功率不但会提高放大器的效率, 降低信噪比, 而且会抑制放大过程中信号光线宽的展宽。同时, 对比所测得光谱图(图 3)可以看出, 输出线宽展宽程度与输出光中 ASE 功率成正相关, ASE 功率上升, 输出线宽增加。分析其原因笔者认为, ASE 功率是输出光中非相干辐射强度的重要标志。由于种子光功率的降低, 导致输出光中 ASE 功率上升。不但在 1 530~1 545 nm 波段 ASE 功率增长明显, 在信号光所在波长附近, 即 1 550 nm 附近的 ASE 功率也会随总功率上升而增强。实验中, 由于信号光功率很

高,因此,在光谱中很难观察到这部分 ASE 功率的变化。由于这部分 ASE 功率的增长,导致了信号光的光谱展宽,这与参考文献[12]中的理论预测一致。

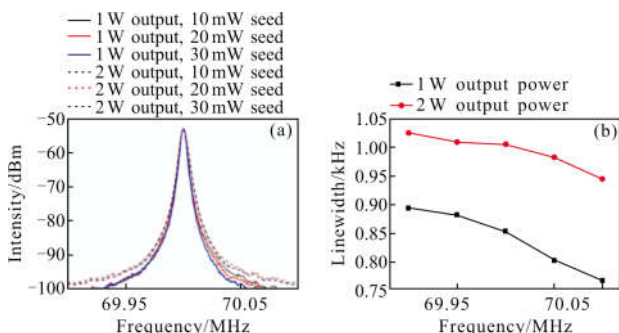


图 4 (a)不同种子功率下,输出功率为 1 W 和 2 W 时,线宽测量线形图;(b)线宽与种子光功率之间的关系曲线

Fig.4 (a) Measured lineshapes with different seed powers at 1 W and 2 W output power; (b) the linewidth versus seed laser power with different output powers

2.2 温度对线宽的影响

增益光纤的温度对放大器工作状态影响明显,不但影响掺杂离子的吸收,进而影响输出效率,而且也会影响输出的光谱宽度。为研究增益光纤温度的影响,实验中通过热沉控制增益光纤温度,对不同温度下输出功率、输出光谱和线宽进行了测量,研究增益光纤温度对输出线宽的影响情况。

首先,增益光纤的温度影响掺杂离子的吸收,进而影响放大器的效率。选择种子光功率为 30 mW,通过改变由 TEC 控制的热沉表面的温度,研究不同温度下放大器的斜率效率和线宽变化情况。如图 5 所示为 15、25、35 °C 时,测得的光纤放大器输出功率与泵浦光功率之间的关系曲线。可以看出:随着温度增加,放大器的斜率效率缓慢上升。15 °C 时,斜率效

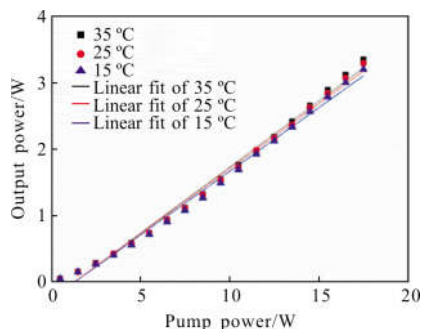


图 5 不同温度下,输出功率与泵浦功率之间的关系曲线

Fig.5 Output power versus pump power with different temperatures

率为 19.0%,当温度上升到 35 °C 时,斜率效率上升到 19.8%。这种斜率效率随温度变化的实验现象与 Chen 等人在参考文献[13]中理论计算的结果一致。产生这种现象的原因是当温度上升时,Er³⁺的吸收效率上升,同时 Yb³⁺的吸收截面增加,促进 Yb³⁺通过交叉弛豫向 Er³⁺转移泵浦能量,提高了 Er³⁺波段的放大效率^[12]。

其次,温度的上升会增加 Er³⁺上能级粒子数积累,使得 Er³⁺波段的自发辐射增强^[12]。相比于种子光功率对放大器斜率效率的影响,温度对斜率效率的影响较小。因此,为了对比方便,选择相同种子光功率,相同泵浦功率,不同温度下的输出情况进行对比,研究温度因素对放大器放大线宽的影响。实验中,选择泵浦功率分别 7 W 和 12 W 时,即输出光功率在 1 W 和 2 W 附近的放大器输出光谱进行对比研究。利用光谱仪对不同温度下的输出光谱进行测量,如图 6(a)和(b)所示。当增益光纤温度上升时,几乎 Er³⁺波段所有波长上的 ASE 功率都会增加。其中,波长在 1 530~1 545 nm 附近的 ASE 功率增涨较为明显。泵浦功率为 7 W 时,温度从 15 °C 上升到 35 °C 的过程中,ASE 功率上升约 1.5 dB。泵浦功率为 12 W 时,随着温度上升,ASE 功率增加了约 3.8 dB。可以看出:温度对钕镱共掺光纤放大器输出特性的影响明显。提高钕镱共掺光纤温度可以提高放大效率,但同时会增加输出光中的 ASE,降低输出信噪比。

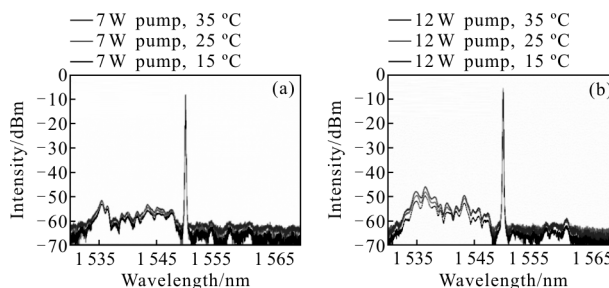


图 6 不同温度下,泵浦功率分别为 7 W(a)、12 W(b)时的输出光谱图

Fig.6 Output spectra with different temperatures at 7 W (a) and 12 W (b) pump power

为了研究增益光纤温度对放大后线宽的影响,对不同温度下放大器输出线宽进行了测量,其线型如图 7(a)所示。通过洛伦兹线型拟合和计算,得到其

输出光线宽随温度的变化情况,如图 7(b)中黑色线所示。为讨论方便,放大器斜率效率随温度的变化曲线一并在图 7(b)中用红色线表示。增益光纤温度上升,不但会提高放大器输出效率,提高输出功率,而且会使输出线宽展宽。温度从 15 °C 每上升 10 °C,斜率效率上升 0.4 %。输出线宽也随着温度上升而增加。泵浦功率为 7 W 时,随温度上升,输出线宽从 0.75 kHz 展宽到 0.91 kHz。泵浦功率为 12 W 时,输出线宽从 0.84 kHz 展宽到 1.12 kHz。根据上一节中所讨论的种子光功率对线宽的影响,可以推测温度上升导致输出线宽展宽的原因。随着温度上升,输出光中波长在信号光附近的 ASE 功率上升,导致了信号光的光谱展宽。因此,相对于一般钕共掺光纤放大器而言,放大单频信号的钕共掺光纤放大器需要通过选择更好的散热设备,更严格控制增益光纤温度,避免由于温度上升而导致的线宽展宽。同时,在设计单频光纤放大器时,需综合考虑放大器增益和放大器输出线宽,根据实际需求,进行合适的热管理。

3 结 论

文中对 1 550 nm 单频 EYDFA 中种子光功率、增益光纤温度对输出线宽的影响情况进行了实验研究。实验结果表明,增加种子光功率不但会提高放大器斜率效率而且会降低输出光中 ASE 强度,进而降低输出线宽展宽的程度。其次,通过实验研究增益光纤温度对输出线宽的影响发现,增益光纤温度上升可以提高钕共掺光纤放大器斜率效率,但同时会增加 ASE 强度和输出线宽展宽量。最后,对种子光功率和温度影响放大器输出线宽的原因进行了分析,认为 ASE 是输出线宽展宽的原因之一。同时,讨论了温度对窄线宽钕共掺光纤放大器输出特性的影响,对设计优化单频钕共掺光纤放大器的热管理系统有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] Zhu X, Liu J, Bi D, et al. Development of all-solid coherent Doppler wind lidar [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 10(1): 60–62.
- [2] Shi Wei, Fu Shijie, Fang Qiang, et al. Single-frequency fiber laser based on rare-earth-doped silica fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1003001. (in Chinese)
史伟, 付士杰, 房强, 等. 基于稀土掺杂石英光纤的单频光纤激光器[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(10): 1003001.
- [3] Qi G, Xiong S, Liang X, et al. High-performance and narrow line-width nanosecond pulse laser amplifier for weak signal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3234–3237.
- [4] Alegria C, Jeong Y, Codemard C, et al. 83-W single-frequency narrow-linewidth MOPA using large-core erbium-ytterbium co-doped fiber [J]. *Photonics Technology Letters*, 2004, 16(8): 1825–1827.
- [5] Kablukov S I, Zlobina E A, Podivilov E V, et al. Output spectrum of Yb-doped fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2508–2510.
- [6] 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(30): 2997–2999.
- [7] Cowle G J, Morkel P R, Laming R I, et al. Spectral broadening due to fibre amplifier phase noise[J]. *Electronics*

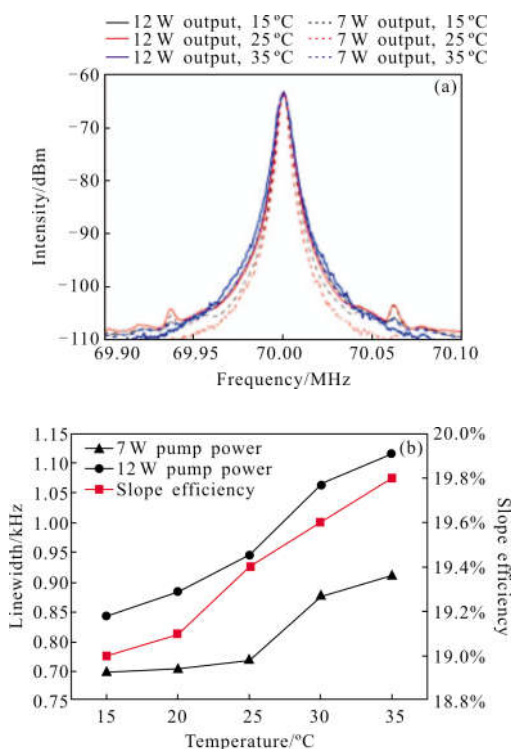


图 7 (a)不同温度下,泵浦功率为 7 W 和 12 W 时,线宽测量线形图;(b)线宽和斜率效率与温度之间的关系曲线
Fig.7 (a) Measured lineshapes with different temperatures; (b) the linewidth and slope efficiency versus temperature at 7 W and 12 W output power

- Letters*, 1990, 26(7): 424–425.
- [8] Yang C, Xu S, Mo S, et al. 10.9 W kHz–linewidth one-stage all-fiber linearly-polarized MOPA laser at 1 560 nm [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12546–12551.
- [9] Bai X, Sheng Q, Zhang H, et al. High-power all-fiber single-frequency Erbium-Ytterbium co-doped fiber master oscillator power amplifier [J]. *Photonics Journal*, 2015, 7(6): 1–6.
- [10] Moller L. Novel aspects of spectral broadening due to fiber amplifier phase noise[J]. *Quantum Electronics*, 1998, 34(9): 1554–1558.
- [11] Iolanda R, Simona M, Pasquale M, et al. Phase noise analysis of a 10 Watt Yb-doped fibre amplifier seeded by a 1-Hz–linewidth laser [J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 14618–14626.
- [12] Rochat E, Dandliker R, Haroud K, et al. Fiber amplifiers for coherent space communication [J]. *Quantum Electronics*, 2001, 7(1): 64–80.
- [13] Chen W, Sha J, Wang Y, et al. Investigation of temperature influence on output performances of high-power cladding-pumped Er, Yb co-doped fiber laser [C]//SPIE, 2013, 86012: 86012A.