

温度对自种子直线腔光纤激光器的影响研究

郝蕴琦^{1,2,3}, 钟梦阳^{1,2,3}, 韩艺良^{1,2,3}, 刘楠楠^{1,2,3}, 翟凤潇^{1,2,3}, 杨坤^{1,2,3*}(1. 郑州轻工业大学 电子信息学院, 郑州 450001; 2. 郑州轻工业大学 河南省磁电信息功能材料重点实验室, 郑州 450001;
3. 郑州轻工业大学 郑州市信息光学与光电技术重点实验室, 郑州 450001)

摘要: 为了研究温度对光纤激光器输出性能的影响, 构建了一种自种子直线腔光纤激光器。该激光器采用掺铒光纤作为腔内放大增益介质, 并利用光纤布喇格光栅(FBG)和光纤环镜组成线形激光腔。通过改变腔中核心器件的温度对激光器进行了实验研究。实验结果表明: 随着温度的升高, 激光器波长线性增加; 与 FBG 自身加热时激光器的输出波长变化相比, 激光器波长额外红移 0.052 43 nm。当温度从 25℃ 升高至 55℃ 时, 激光器输出转换效率降低了 4.878%, 输出功率降低了 33%。

关键词: 掺铒光纤激光器; 自种子; 温度; 输出性能

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)05-0113-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.05.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect research of temperature on self-seeded linear cavity fiber laser

HAO Yunqi^{1,2,3}, ZHONG Mengyang^{1,2,3}, HAN Yiliang^{1,2,3}, LIU Nannan^{1,2,3}, ZHAI Fengxiao^{1,2,3}, YANG Kun^{1,2,3*}

(1. School of Electronics and Information, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Key Laboratory of Magnetolectric Information Function Materials, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China; 3. Zhengzhou Key Laboratory of Information Optics and Photoelectric Technology, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to study the effect of temperature on the output performance of fiber lasers, a self-seeded linear cavity fiber laser is constructed. The laser uses erbium-doped fiber as the gain medium, and uses fiber Bragg grating (FBG) and fiber ring mirror to form a linear laser cavity. The laser is experimentally studied by changing the temperature of the core device in the cavity. The experimental results show that the laser wavelength increases linearly with the increase of temperature. Compared with the change of the output wavelength of the laser when the FBG itself is heated, the laser wavelength is redshifted by 0.052 43 nm. When the temperature is increased from 25℃ to 55℃, the output conversion efficiency of the laser is reduced by 4.878%, and the output power is reduced by 33%.

Key words: erbium doped fiber laser, self-seeded, temperature, output performance

0 引言

光纤激光器作为一种窄线宽光源, 在分布式光纤

收稿日期: 2024-02-29。

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(No.232102210175, 242102211088)资助; 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目(No.2021GGJS092)资助; 郑州轻工业大学青年骨干教师培养对象资助计划项目资助。

作者简介: 郝蕴琦(1985—), 女, 河南扶沟人, 博士, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向是基于散射效应的分布式光纤传感技术、布里渊光纤激光器、散射信号处理。主持并完成了国家自然科学基金、河南省科技攻关计划、河南省青年骨干教师资助项目计划等国家/省部级科研项目十多项, 授权发明专利 5 项。

* **通信作者:** 杨坤(1980—), 男, 博士, 主要研究方向为光学测量技术。



传感、光纤相干检测等领域得到了广泛的应用^[1-4]。利用掺铒、掺镱、掺铥、掺钬等不同掺杂的增益光纤, 可以实现不同波段的高质量激光光束, 这吸引了全球相关研究人员的广泛关注^[5-7]。掺铒光纤(EDF)作为一种常用的 1 550 nm 波段光放大方式, 当用作光纤激光器中的增益介质时, 所产生的激光可以实现与光纤通信领域内的各种光纤元器件的融合与集成。与环形腔结构相比, 直线腔激光器结构更为简单、紧凑, 其谐振腔中的滤波器可以直接滤出所需的激光波长。其中, 自种子光纤激光器不需要额外增加泵浦光源, 仅利用增益光纤自身的增益谱, 结合滤波器作用, 就可以实现窄线宽激光输出^[8]。但是, 温度作为一种常见的环境参

郝蕴琦, 钟梦阳, 韩艺良, 等: 温度对自种子直线腔光纤激光器的影响研究

数,会导致激光器中的 EDF 和滤波器等关键器件的参数发生变化,从而影响光纤激光器的输出性能^[9-11]。因此,研究 EDF 激光器的温度影响,并提升以 EDF 为核心器件的光纤激光器性能是研究和应用领域的重要课题^[12-14]。NOBUYUKI K 等人^[15]率先开启了 EDF 增益的温度特性研究,在此基础上诸多研究人员进行了以 EDF 增益为核心的光纤激光器的温度特性分析^[16-20]。LE G J 等人^[16]报道了低温条件下 EDF 激光器的输出性能,但只进行了数值仿真,并未进行实验研究。国防科技大学韩凯课题组^[17]研究了光纤纤芯温度的分布测量方法以用于提升高功率光纤激光器的性能,但仅限于核心器件增益光纤的温度分析。天津大学姚建铨课题组^[18-19]研究了增益光纤温度对铒镱共掺光纤放大器输出线宽的影响和高温老化后的功率变化,但未探讨系统中其它器件的温度变化对放大效率等参数的影响。中科院大学陈磊等人^[20]通过半导体制冷器温控改变光纤激光器谐振腔整体的温度,实现了分布式布喇格反射器(DBR)光纤激光器的波长调谐,但是并未分析激光腔中单个元器件的温度变化对激光器整体性能的影响。

本文构建一种自种子线性腔光纤激光器,探讨温度对激光器输出波长、转换效率、输出功率等参数的影响,分析单个器件温度变化时激光器性能的变化情况。

1 系统装置

EDF 激光器的核心元件是 EDF。本文实验中所搭建的自种子直线腔激光器装置结构图如图 1 所示。2 个 980 nm 泵浦光源通过波分复用器(WDM)实现对 2 m 长的 EDF 进行双向泵浦(Nufern,EDFC-980-HA);使用 1:1 光纤耦合器构建的光纤环境(FLM)与高反射率的光纤布喇格光栅(FBG)共同组成了直线型激光腔;在 95:5 的光纤耦合器中,通过 5%的端口实现了激光输出。980 nm 泵浦源将 EDF 中的铒离子从低能级抽运至高能级,辐射出宽带自发辐射光(ASE)。中心波长为 1 547.4 nm、反射率为 99%的 FBG 具有滤波作用,并将该波长处的光反射回激光腔中。在直线腔的另一

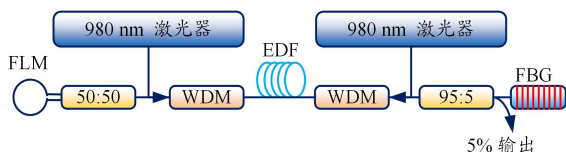


图 1 自种子直线腔 EDF 激光器装置

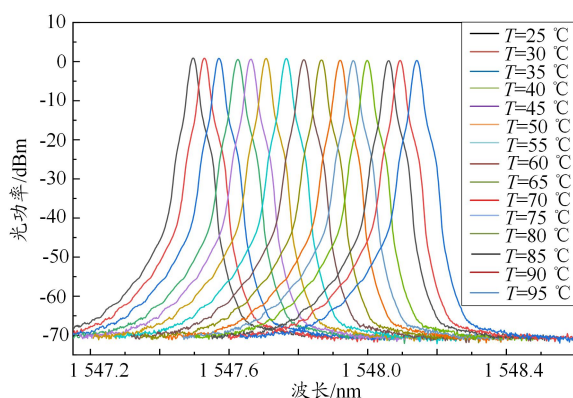
端,FLM 提供了接近 100%的光反射。FBG 和 FLM 共同作用,使 1 547.4 nm 的光在腔内往返振荡,从而形成激光输出。

在光纤激光器的工作过程中,环境温度的变化会导致关键器件(如 EDF 和 FBG)的工作特性发生变化。对于用于滤波的 FBG 而言,温度变化会导致其中心波长发生线性变化;而对于作为增益介质的 EDF,温度变化会引起其中各能级的粒子数发生变化。光纤的吸收截面和发射截面是温度的函数,这意味着不同温度下 EDF 的增益系数也会相应地发生变化。这些核心器件的温度特性会进一步影响激光器的整体输出特性,包括输出波长、转换效率、输出功率等。

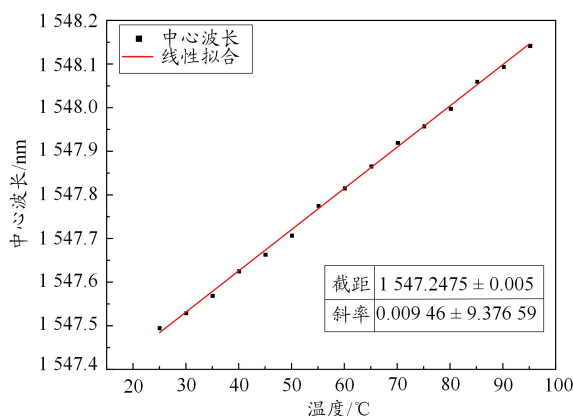
2 实验结果与讨论

2.1 温度对激光器输出波长的影响

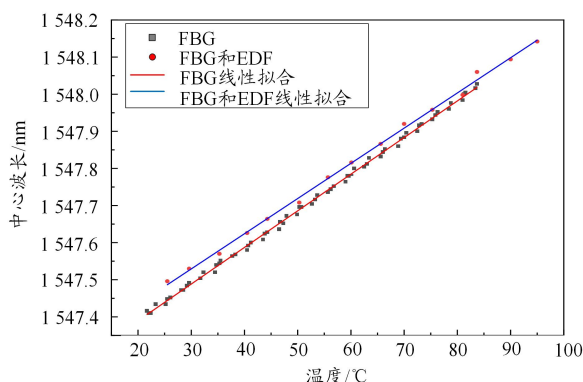
为了研究温度对激光器输出波长的影响,实验中将 2 m 长的 FBG、EDF 和 FLM 同时放入恒温水浴中,得出的激光输出光谱如图 2(a)所示。可以看出,激光器输出光谱的中心波长随着温度 T 的升高而向长波方向移动。各个温度下的中心波长变化如图 2(b)所



(a) 激光器输出光谱



(b) 激光器中心波长随温度的变化



(c) FBG 和 FBG+EDF 2 种情况下波长随温度的对比变化情况

图 2 温度对激光器输出波长的影响

示, 线性拟合结果显示波长-温度系数为 $0.009\ 46\ \text{nm}/^\circ\text{C}$ 。由于激光腔中 FLM 工作于宽带范围, 故在实验中不考虑该器件的波长相关性。将 FBG 单独置于恒温水浴与将 FBG 和 EDF 共同置于恒温水浴时激光器输出波长的特性进行对比, 对比情况如图 2(c) 所示。可以看出, 当 EDF 和 FBG 同时升高温度时, 激光器中心波长总是大于 FBG 单个器件升温时的中心波长, 两者之间的差值为 $0.052\ 43\ \text{nm}$, 且产生了红移。

上述实验结果可以通过 EDF 的能级结构来解释。铒离子吸收 $980\ \text{nm}$ 泵浦光的能量, 从基态 $4\text{I}_{15/2}$ 跃迁到激发态 $4\text{I}_{13/2}$ 。由于在激发态上的载流子寿命很短, 铒离子很快以非辐射方式弛豫到亚稳态 $4\text{I}_{13/2}$ 。在持续的泵浦光能量作用下, 亚稳态上的粒子数量不断累积, 最终形成了粒子数反转, 进而实现了光的放大或是宽光谱的自发辐射。一般情况下, EDF 的能级结构中, $4\text{I}_{13/2}$ 和 $4\text{I}_{15/2}$ 能级会分裂成 Stark 能级, 产生多个亚能级。其中, 基态包含 8 个亚能级, 而激发态包含 7 个亚能级^[21]。因此, 在能级模型中, $4\text{I}_{15/2}$ 和 $4\text{I}_{13/2}$ 可被视为 2 个能带。EDF 的自发辐射谱谱宽为 $1\ 530\pm 30\ \text{nm}$ 。

2.2 温度对 EDF ASE 光谱的影响

ASE 光谱的温度特性如图 3 所示。可以看出, 当温度升高时, ASE 宽带光谱整体向长波方向移动。以 $1\ 530\ \text{nm}$ 附近峰为例, $55\ ^\circ\text{C}$ 时峰值为 $-27.600\ \text{dBm}$, 对应波长为 $1\ 529.57\ \text{nm}$; $85\ ^\circ\text{C}$ 时峰值为 $-28.331\ \text{dBm}$, 对应波长为 $1\ 529.71\ \text{nm}$ 。计算得到波长红移温度系数为 $0.41\ \text{nm}/100\ ^\circ\text{C}$, 这与文献[22]中的研究结果基本一致。该结果依然可以从 EDF 的能级结构角度来解释。在热平衡状态下, 铒离子各能级上的粒子数分布遵循玻尔兹曼分布。温度的变化会导致各能级上粒子数的变化。在室温及更高温度下, Stark 能级会发生均匀加宽

现象^[23]。随着温度升高, 能级展宽也会增加。根据玻尔兹曼分布定律, 较低能级上的铒离子数目增多, 而较低能级对应的光谱位于较长波长部分, 因此 EDF 的 ASE 宽带光谱整体向长波方向移动, 即发射光谱整体出现红移。

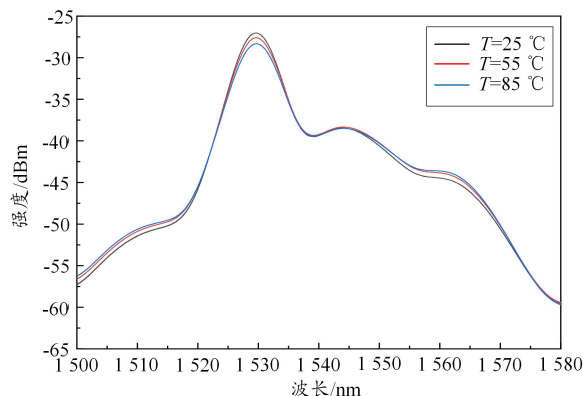


图 3 温度对 EDF ASE 光谱的影响

2.3 温度对激光器输出功率的影响

将 EDF 的 $980\ \text{nm}$ 泵浦功率固定在 $300\ \text{mW}$, 并将激光腔置于恒温水浴中。通过改变恒温水浴的温度, 在 $30\sim 95\ ^\circ\text{C}$ 内以 $5\ ^\circ\text{C}$ 的间隔依次测量激光器的输出功率。在仅将 FBG、FBG 和 EDF 共同置入恒温水浴这 2 种情况下的激光器输出功率实验结果如图 4 所示。可以看出, 当仅将 FBG 处于恒温水浴中时, 随着温度的上升, 激光器的输出功率稳定在 $1.29\ \text{mW}$ 左右, 变化量为 $0.008\ \text{mW}$ 。结合图 2(c) 可知, 在仅考虑 FBG 的情况下, 温度的变化对激光器的输出功率产生的影响基本可以忽略不计, 而其主要影响则体现在激光器的输出波长上。但是, 当将 FBG 和 EDF 同时处于恒温水浴中时, 激光器光功率从 $1.211\ \text{mW}$ 减小至 $0.812\ \text{mW}$, 变化范围为 $0.4\ \text{mW}$, 改变量为 33% , 且随着温度的降

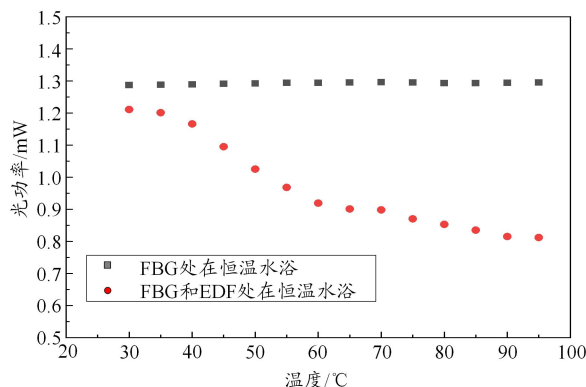


图 4 温度对激光器输出功率的影响

郝蕴琦, 钟梦阳, 韩艺良, 等: 温度对自种子直线腔光纤激光器的影响研究

低激光器输出功率接近线性下降。这是因为随着温度的升高, 下能级的粒子数会增多, 这导致吸收截面也随之增大, 进而使得吸收损耗增加, 因此激光器的输出功率随之降低。

2.4 温度对激光器转换效率的影响

设置恒温水浴的温度为 55 °C, 并对以下 3 种情况的激光器转换效率进行对比分析: 室温条件下、仅 FBG 处于恒温水浴中以及 FBG 和 EDF 同时置于恒温水浴中。通过改变 980 nm 泵浦激光器的功率范围(0~350 mW), 得到了温度对激光器转换效率的影响, 如图 5 所示。可以看出, 激光器的转换效率基本不受 FBG 所处温度的影响。当 FBG 分别处于室温(25 °C)和恒温水浴温度(55 °C)时, 激光器的转换效率几乎一致, 均为 0.41%。这是因为尽管 FBG 的中心波长会随温度升高而增加, 同时鉴于激光器输出功率在图 4 中展现出的高度稳定性, 其转换效率在 25~55 °C 的宽温度范围内几乎未发生显著变化, 显示出卓越的温度适应性。而这 2 种情况下的激光器转换效率又不完全一致的原因在于: 当温度升高时, FBG 和激光器的波长均向长波方向移动了 0.28 nm, 在 1 550 nm 波长所对应的 EDF 的增益从左到右略有增加。进一步分析发现, 当 FBG 与 EDF 同时置于 55 °C 的恒温水浴中时, 激光器的转换效率降低到了 0.39%。这意味着当温度升高到 30 °C 时, 激光器的转换效率降低了 4.878%。这是因为随着 EDF 纤芯温度的升高, 根据玻尔兹曼分布定律, 钇粒子能级结构中基态粒子数增加, 导致吸收截面增加而发射截面减小, 即 EDF 的增益系数降低, 最终造

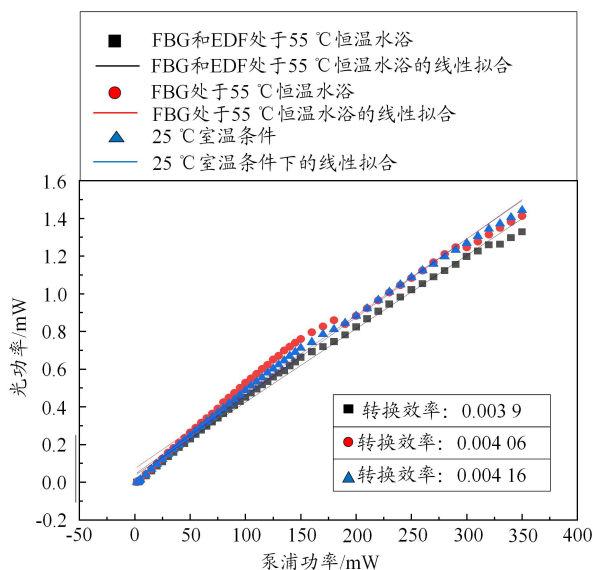


图 5 温度对激光器转换效率的影响

成激光器阈值升高, 斜率效率降低。

结合图 2 和图 5 可知, 温度对激光器输出性能的影响主要体现在 2 个方面: 一是输出波长的变化受滤波器 FBG 中心波长随温度波动的影响; 二是输出功率和转换效率的变动由 EDF 在不同温度下的增益系数变化所决定。

此外, 实验对比分析了 3 种情况下激光器输出功率的稳定性。将 2 台 980 nm 激光器的泵浦功率均设置为 300 mW, 并测量室温条件下、仅 FBG 处于恒温水浴中以及 FBG 和 EDF 同时置于恒温水浴中这 3 种情况下 1 h 内激光器的输出功率, 结果如图 6 所示。可以看出, 当仅将 FBG 的温度升高到 55 °C 而保持 EDF 的温度在室温 25 °C 时, 激光器的激光输出强度与室温时相近; 相比之下, 当将 FBG 和 EDF 的温度同时提高到 55 °C 时, 激光器的输出功率有所下降, 这与图 5 中的实验结果一致。

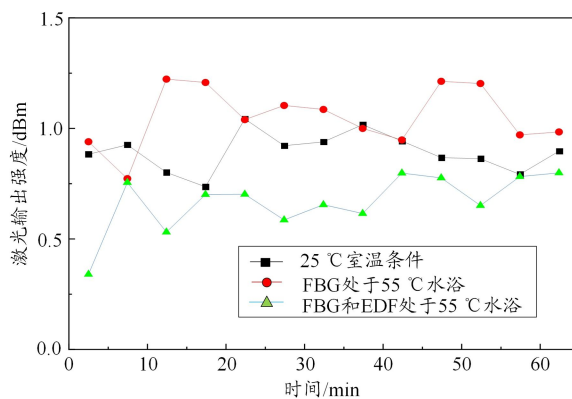


图 6 3 种情况下, 激光输出强度对比

3 结束语

针对光纤激光器在工程应用中环境温度对激光器输出性能的影响, 本文利用 FBG 和 FLM 构建激光腔, EDF 提供增益, 搭建了自种子直线腔光纤激光器。对比分析了室温、仅 FBG 升温、FBG 与 EDF 共同升温这 3 种情况下激光器的输出波长、转换效率、光强变化以及输出光强稳定性。实验结果表明: 随着温度的升高, 激光器输出波长线性增加, 与 FBG 自身的波长变化相比, 波长额外红移 0.052 43 nm, 这与 EDF 的 ASE 光谱随温度升高向长波方向移动有关。此外, 当把 FBG 与 EDF 同时置于 55 °C 恒温水浴中时, 激光器的输出光转换效率降低了 4.878%, 输出功率降低了 33%。在不同的温度条件下, 搭建的自种子直线腔光纤激光器在 1 h 内的输出激光强度相对稳定表现稳定。

上述研究结果可为 EDF 激光器的转换效率优化或波长调谐等工程应用提供技术参考。

参考文献:

- [1] LIN W H, ZHAO F, SHAO L Y, et al. Temperature sensor based on Er-doped cascaded-peanut taper structure in-line interferometer in fiber ring laser[J]. IEEE Sensor Journal, 2021, 21(19): 21594–21599.
- [2] DIAZ S, SAN F N, SOCORRO-LERANOZ A B, et al. Temperature sensor using a multiwavelength Erbium-doped fiber ring laser[J]. Journal of Sensors, 2017, 8187451-1–8187451-6.
- [3] LIU H C, HE W, ZHANG Y M, et al. Erbium-doped fiber laser based on intermodal interference between single-mode fiber and suspended core fiber for strain and temperature sensing[J]. Optical Fiber Technology, 2023, 75: 103203-1–103203-8.
- [4] ZHANG L Q, TIAN Z, CHEN N K, et al. Room-temperature power-stabilized narrow-linewidth tunable Erbium-doped fiber ring laser based on cascaded Mach-Zehnder interferometers with different free spectral range for strain sensing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(7): 1966–1974.
- [5] XIAO J H, CAO J K, WANG Y F, et al. Temperature dependent energy transfer in Bi/Er codoped barium gallogermanate glasses for tunable and broadband NIR emission[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(34): 10544–10550.
- [6] XIE H B, ZHANG J N, WANG F, et al. High-power 1640 nm Er:Y₂O₃ ceramic laser at room temperature[J]. Optics Letters, 2022, 47(2): 246–248.
- [7] 武洋, 潘蓉, 杨鹏, 等. 基于气相沉积法的掺铒光纤制备与温度特性[J]. 激光技术, 2023, 47(6): 841–845.
- [8] ZUXING Z, LI Z, YUXING X. Tunable self-seeded multiwavelength Brillouin-Erbium fiber laser with enhanced power efficiency[J]. Optics Express, 2007, 15(15): 9731–9736.
- [9] WU D, TIAN S, ZHANG X J, Y et al. Temperature controllable optical switch for erbium-doped random fiber laser[J]. Optics and Laser Technology, 2022, 148: 107772-1–107772-5.
- [10] NEMEC M, SULC J, SVEJKAR R, et al. Temperature influence on Er:YAlO₃ spectroscopy and diode-pumped laser properties[J]. Laser Physics, 2018, 28(10): 105801-1–105801-8.
- [11] HE Q, WANG F, LIN ZQ, et al. Temperature dependence of spectral and laser properties of Er³⁺/Al³⁺ co-doped aluminosilicate fiber[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(10): 101401-1–101401-5.
- [12] LEE H Y, YOON H, CHANG J, et al. Temperature insensitive distributed-feedback Er-doped fibre lasers[J]. Telecommunications Review, 2000, 10(5): 1060–1074.
- [13] XUANTUNG P, JINHAI S I, CHEN T, et al. Ultra-high-temperature resistant distributed Bragg reflector fiber laser based on type II-IR fiber Bragg gratings[J]. Applied Optics, 2020, 59(10): 3081–3085.
- [14] SKALSKY M, HNIDKA J, HAVRÁNEK Z. Improvement of the temperature stability of the Erbium-doped superfluorescent fiber source by tuning the reflectivity of the fiber end[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(6): 1843–1850.
- [15] NOBUYUKI K, AKIRA O, KAZUNORI N. Temperature dependence of the gain in erbium-doped fibers[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1991, 9(2): 261–265.
- [16] LE G J, OUDIN J, PERRAULT P, et al. On the effect of low temperatures on the maximum output power of a coherent Erbium-doped fiber amplifier[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(14): 3611–3619.
- [17] 周子超, 崔文达, 奚小明, 等. 高功率光纤激光器纤芯温度在线测量技术及其应用研究进展[J]. 光学学报, 2023, 43(17): 161–171.
- [18] 白晓磊, 盛泉, 张海伟, 等. 单频 EYDFA 中种子光功率和增益光纤温度对输出线宽的影响[J]. 红外与激光工程, 2018(10): 102–107.
- [19] 任康宇, 史伟, 张雅婷, 等. 钕镱共掺光纤放大器的高温老化输出功率[J]. 光学学报, 2022(4): 15–22.
- [20] 陈磊, 朱嘉婧, 李磐, 等. DBR 单纵模光纤激光器波长温度调谐[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(4): 74–81.
- [21] 姜中宏. 新型光功能玻璃[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [22] 齐翊, 陈伟民, 雷小华, 等. 温度对掺铒光纤光谱特性影响研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(7): 2006–2010.
- [23] BECKER P C, OLSSON N A, SIMPSON J R. Erbium-doped fiber amplifier: fundamental and technology[M]. London: Academic Press, 1999.