

doi: 10.3788/gzxb20164510.1014001

1 150 nm 掺镱光纤激光器输出特性实验研究

湛鸿伟, 沈炎龙, 陶蒙蒙, 栾昆鹏, 黄珂, 于力, 易爱平, 冯国斌

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 西安 710024)

摘 要:以光纤光栅对为激光腔、双包层掺镱光纤为增益介质、976 nm 半导体激光器为泵浦源, 研制全光纤化的 1 150 nm 波段长波光纤激光振荡器. 在室温下实现了最大平均输出功率为 12.7 W 的 1 150 nm 波段单模光纤激光输出, 激光振荡器的光光转换效率为 42.33%. 最大功率输出时, 激光中心波长为 1 150.48 nm, 光谱的 3 dB 线宽为 0.45 nm, 边模抑制比达 38 dB. 该研究对研制 1 150 nm 波段高功率光纤激光振荡器具有一定的参考价值.

关键词:光纤激光; 1 150 nm 波段; 激光振荡器; 放大自发辐射谱; 寄生激光振荡

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)10-1014001-6

Experimental Investigation of an 1 150 nm Yb-doped Fiber Laser

CHEN Hong-wei, SHEN Yan-long, TAO Meng-meng, LUAN Kun-peng,
HUANG Ke, YU Li, YI Ai-ping, FENG Guo-bin

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology,
Xi'an 710024, China)

Abstract: An all-fiber 1 150 nm long-wavelength fiber laser oscillator was demonstrated by using a pairs of fiber bragg grating as the laser cavity, a piece of Yb-doped as the gain media and a 976 nm laser diode as the pump source. 1 150 nm band single-mode fiber laser with max output power of 12.7 W is obtained at room temperature and the optical-to-optical conversion efficiency is up to 42.33%. The central wavelength is 1 150.48 nm, the 3 dB spectral width is 0.45 nm and the optical signal-to-noise ratio is 38 dB. The research results will make a contribution to the further development of high-power 1 150 nm long-wavelength fiber laser oscillator.

Key words: Fiber laser; 1 150 nm band; Laser oscillator; Amplified spontaneous emission; Parasitical laser oscillation

OCIS Codes: 140.3460; 060.3510; 140.3510; 140.3615; 140.3070

0 引言

中红外波段激光在光谱学、医疗、环保、国防等诸多领域得到广泛的应用. 目前, 3 μm 波段光纤激光是中红外激光技术领域的研究热点^[1]. 基于掺铒氟化物光纤的中红外光纤激光技术发展较快, 其最高平均输出功率已达 30 W^[2-6]. 与之相比, 公开报道的红外掺铽光纤激光器的最高输出功率仅为 7.2 W, 而国内报道的中红外掺铽光纤激光器的平均功率水平仅为 1 W^[7-9]. 掺铽氟化物光纤激光器需要使用 1 150 nm 波段激光作为泵浦源^[10]. 但是, 1 150 nm 半导体激光器

(Laser Diode, LD) 技术并未像 976 nm LD 技术那样成熟, 单台 1 150 nm LD 的最大输出功率仅为 3 W^[11]. 目前, 限制中红外掺铽光纤激光器功率提升的主要因素之一便是高功率泵浦源的缺乏.

高效的 1 150 nm 波段激光是发展中红外波段掺铽光纤激光技术必须解决的关键问题. 随着光纤激光技术的发展, 实现 1 150 nm 波段的高功率光纤激光输出已经成为可能. 1 150 nm 波段光纤激光主要通过喇曼效应和基于掺镱光纤直接激光振荡两种方式来实现. 级联喇曼方式中, 光纤激光器结构相对复杂、光学转换效率相对较低. 如文献[7]中采用的 1 150 nm 喇

基金项目: 中国博士后科学基金资助

第一作者: 湛鸿伟(1986-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为激光技术及应用. Email: chenhongwei@nint.ac.cn

收稿日期: 2016-04-11; 录用日期: 2016-07-07

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

曼光纤激光器,其 976 nm LD 泵浦光到 1 150 nm 激光的光光转换效率大约为 20%。基于掺镱光纤直接激光振荡方式中,激光器系统结构简单,光学效率也较高。但是,由于镱离子的发射谱峰位于 1 030 nm 附近^[12]。根据文献[13],工作在 1 130 nm 以上的掺镱光纤激光属于长波光纤维激光。长波掺镱光纤激光器存在易产生放大自发辐射谱(Amplified Spontaneous Emission, ASE)和寄生激光振荡的问题,并且,激光器工作波长越长,谱线增益竞争越严重,实现高功率输出越困难。

采用多种措施抑制短波段的 ASE 和寄生激光振荡,可获得长波掺镱光纤激光输出。2006 年, Kurkov 等^[14]采用纤芯泵浦方式实现了 3.2 W 的 1 160 nm 长波掺镱光纤激光输出。2007 年,同样采用纤芯泵浦方式, S. Sinha 等^[15]利用主振荡功率放大方式产生了 3.35 W 的 1 150 nm 线偏振掺镱光纤激光。2009 年 M. Jacquemet 等^[16]采用 915 nm 半导体激光器泵浦双包层掺镱光纤并通过加热增益光纤等措施,获得了 18 W 的 1 154 nm 激光。2013 年,文献[17]采用 915 nm 半导体激光器泵浦的双包层掺镱光纤激光器实现了最高 35 W 的 1 147 nm 激光输出。2014 年,文献[18]通过数值模拟给出了长波掺镱光纤激光振荡器的一般性设计原则,并实验实现了 33.6 W 的 1 150 nm 长波段掺镱光纤激光输出。现有报道多集中在 1 150 nm 波段掺镱光纤激光的高功率实现上,对于长波光纤维激光振荡器输出特性的细致研究报道并不多。

本课题组在前期的研究工作中,研制了一台 1 150 nm 光纤激光振荡器。采用 975 nm LD 泵浦 50 m 长的掺镱光纤,实现了 4.55 W 的 1 150 nm 激光输出^[19]。然而,其输出功率相对较低,并且该光纤激光振荡器的结构不利于输出功率的进一步提升。另外,由于存在包层杂散光,降低了该激光器的光束质量。本文以光纤光栅对为激光腔、双包层掺镱光纤为增益介质、976 nm LD 为泵浦源,在室温条件下搭建了更加优化的全光纤结构 1 150 nm 波段单模光纤激光振荡器。详细研究了增益光纤长度对光纤激光振荡器的光学转换效率、激光中心波长和激光光谱线宽等输出特性的影响。对后续搭建 1 150 nm 波段高功率光纤激光振荡器具有一定的参考价值。

1 实验装置

图 1 为搭建的全光纤化 1 150 nm 波段光纤激光振荡器的实验装置结构图。光纤激光振荡器的增益介质为 Nufern 公司 LMA-YDF-10/130 型双包层掺镱光纤(Yb-doped fiber, YDF),其纤芯和内包层的直径分别为 10 和 130 μm 、对应的数值孔径分别为 0.08 和 0.46。所用增益光纤的泵浦吸收系数为 3.9 dB/m@976 nm,总长度为 50 m。激光腔由一对 Teraxion 公司

生产的,刻写在与增益光纤匹配的无源双包层光纤上的光纤光栅构成。其中,高反射率(High Reflectivity, HR)光纤光栅的中心波长为 1149.92 nm,反射率为 99.9%,反射带宽为 1.48 nm;输出耦合(Output Couple, OC)光纤光栅的中心波长为 1 149.95 nm,反射率为 71.8%,反射带宽为 0.466 nm。在输出光纤光栅的尾纤后面还熔接一个由创鑫激光公司定制的光纤帽(Endcap),以减小端面回光并防止光纤端面损伤。同时,对该熔接点做了包层光剥离处理。采用凯普林公司所提供的 976 nm LD 作为泵浦源,其最大输出功率为 30 W。输出尾纤的纤芯和包层直径分别为 105 和 125 μm 、纤芯数值孔径为 0.22。实验中,976 nm LD 的泵浦光通过购自 Lightcomm 公司的(2+1) \times 1 熔融拉锥光纤合束器(Tapered Fiber Buddles, TFB)耦合进入增益光纤中,可有效防止 LD 的回光损伤。激光器各部分之间均采用光纤熔接进行连接,形成全光纤一体化结构。实验中,将所有的光纤放置到铝板上,也就是对光纤进行被动传导冷却,但并未采取主动制冷措施。采用 Thorlab 公司 PM100D 型功率计表头和 S314C 型功率计探头(功率分辨率为 1mW)对搭建的光纤激光振荡器的输出功率进行测量。同时,使用 Yokogawa 公司 AQ6370C 型光纤光谱仪(光谱分辨率为 0.01 nm)对输出光谱进行记录。

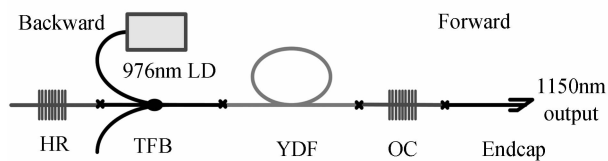


图 1 全光纤化 1 150 nm 光纤激光振荡器装置结构图
Fig. 1 Experimental setup of the all-fiber 1 150 nm fiber laser oscillator

2 实验结果与讨论

首先,研究增益光纤长度对光纤激光振荡器输出特性的影响。在其它实验条件一致的情况下,通过截断法,用长度分别为 50、35、25、15 和 10 m 的掺镱光纤作为增益介质,进行对比实验。在相同的泵浦条件下(泵浦功率最大为 20.9 W),使用不同长度增益光纤的光纤激光振荡器的最大输出功率、光光转化效率、最大输出功率时的激光中心波长和 3 dB 光谱线宽如表 1。

从表 1 可以看出,光纤激光振荡器的输出功率及光光转换效率首先随增益光纤长度的增加而增加,当增益光纤长度为 35 m 时,达到最大值 8.68 W,对应的光光转化效率为 41.53%。随着增益光纤长度的继续增加,输出功率及光光转换效率也随之下降。这表明,长波光纤维激光振荡器中增益光纤的长度存在一个最优值,增益光纤太短和太长都会影响激光器的效率。但是

表 1 采用不同长度增益光纤的光纤激光振荡器的输出特性

Table 1 Output parameters of the 1 150 nm fiber laser oscillators using different length of gain fiber

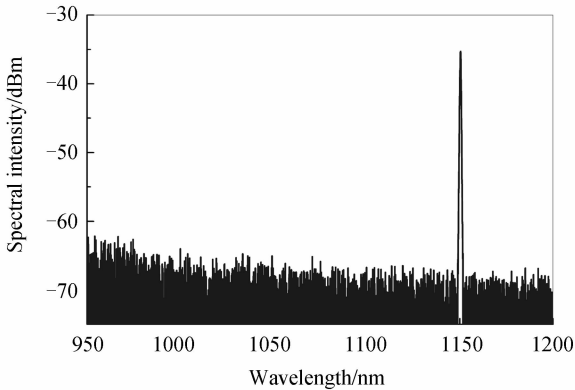
	50 m	35 m	25 m	15 m	10 m
Max output power/W	8.52	8.68	8.50	8.31	7.52
Conversion efficiency	40.76%	41.53%	40.67%	39.76%	35.98%
Central wavelength/nm	1 150.45	1 150.47	1 150.41	1 150.39	-
3 dB spectral width/nm	0.48	0.43	0.36	0.33	-

在 15~50 m 的长度范围内,增益光纤长度对激光振荡器效率的影响有限.在光纤激光器中,增益光纤是比较昂贵的器件之一.本文实验研究结果表明,适当地降低光学转换效率要求,采用相对较短的增益光纤,同样可以获得较高效率、成本大幅缩减的长波光纤激光输出.

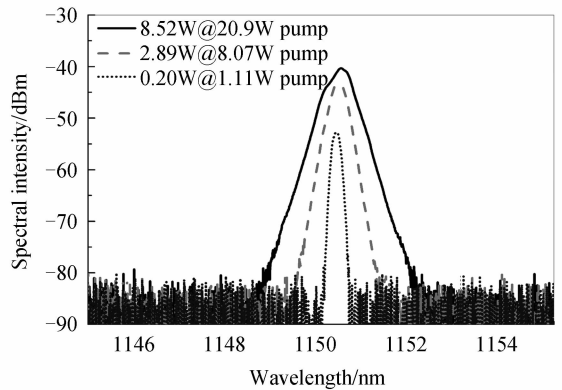
采用不同长度增益光纤的光纤激光振荡器的光谱输出特性如图 2.图 2(a)、(c)、(e)和(g)为最大功率时的输出光谱(950~1 200 nm),图 2(b)、(d)、(f)和(h)为不同功率水平下的输出光谱(1 145~1 150 nm,图例中前一数值表示激光功率,后一数值表示泵浦功率).从表 1 和图 2 可以看出,采用不同增益长度光纤的激光振荡器的输出光谱在 1 000~1 110 nm 波段均未出现 ASE,也没有 976 nm 的泵浦光残余.该激光振荡器较好的光谱特性得益于实验中使用了较长的增益光纤(使用同型号掺镱光纤搭建 1 064 nm 波段光纤激光器,增益光纤用量仅为 4 m 左右).较长的增益光纤可以充分吸收泵浦光,并且对短波 ASE 成分具有重吸收效应,有利于 ASE 的抑制和长波段激光的激发.同

时,较高反射率的输出光纤光栅能够提供足够强的信号光反馈,使得 1 150 nm 波段激光在与其它光谱成分的谱线增益竞争中占据优势,从而有助于抑制寄生振荡和短波 ASE.

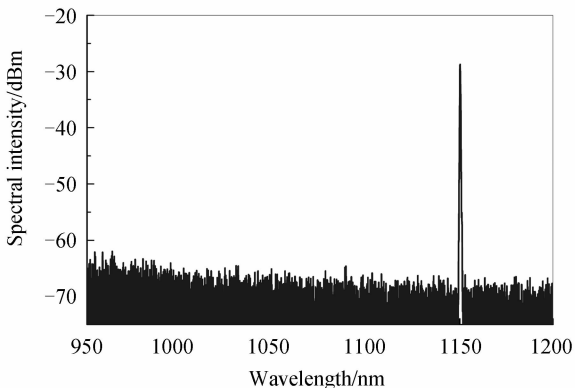
对比采用不同增益长度光纤的光纤激光振荡器的输出光谱,还观察到:对于增益光纤长度固定的光纤激光振荡器来说,光纤激光振荡器的输出光谱线宽随泵浦功率的增加而加宽,并且激光中心波长随泵浦功率的增加发生红移;在同样的泵浦条件下,增益光纤长度越长,激光振荡器的输出光谱也越宽.另外,在其它条件一致的情况下,光纤激光振荡器的输出激光光谱的中心波长也与增益光纤长度有关.当增益光纤长度增加时,激光振荡器的中心波长越长,即红移量越大.但是,当增益光纤长度为 35 m 时,激光器的中心波长也达到最长(为 1 150.47 nm),随着增益光纤长度的增加,激光器的中心波长又出现蓝移.我们认为,这主要是由于增益光纤长度为 35 m 时,激光振荡器转换效率



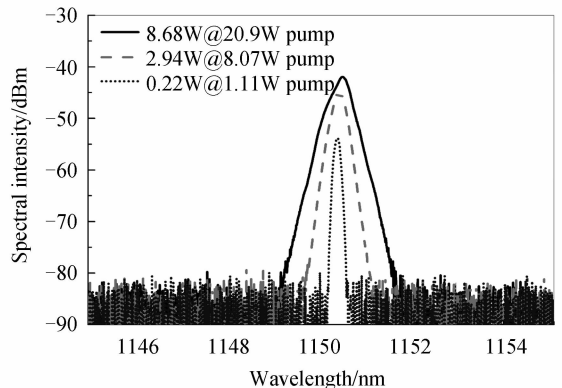
(a) Output spectra of 50 m case under the maximum output



(b) Output spectra of 50 m case under different power levels



(c) Output spectra of 35 m case under the maximum output



(d) Output spectra of 35 m case under different power levels

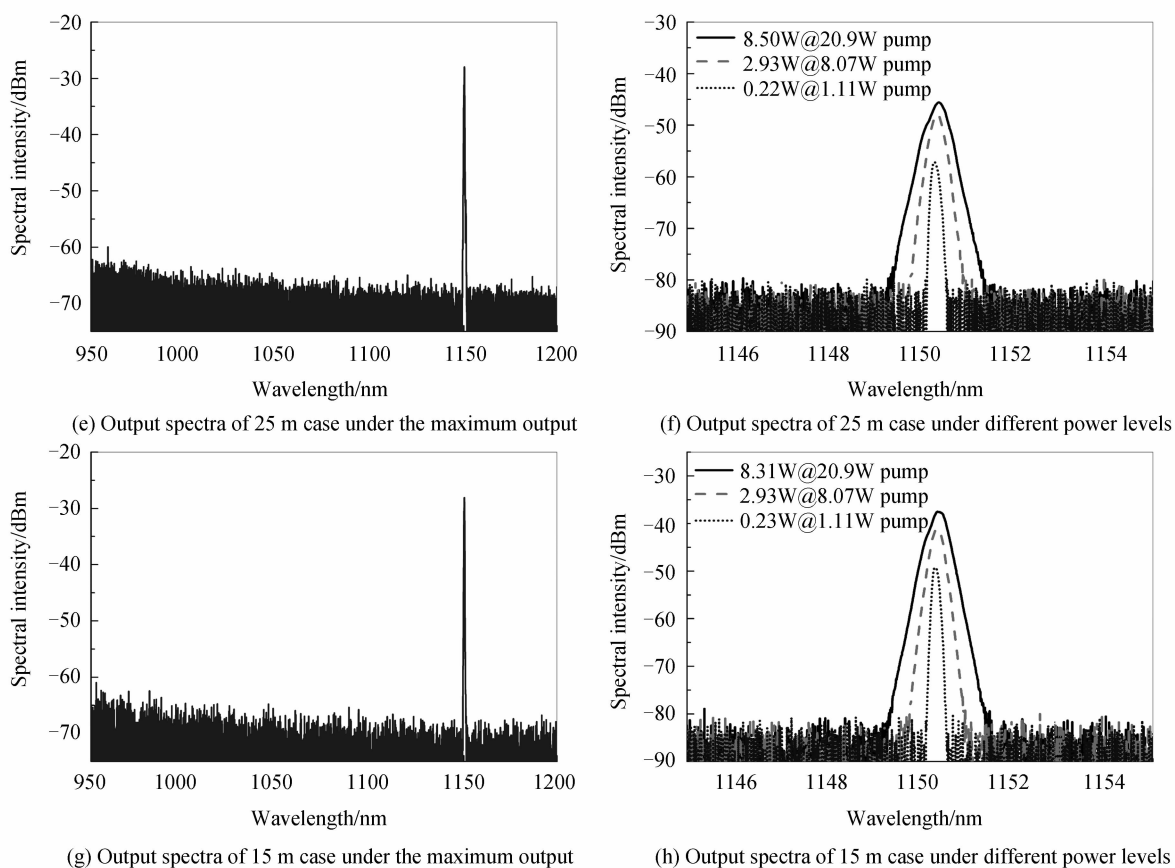


图 2 不同长度增益光纤的光纤激光振荡器的光谱特性

Fig. 2 Output spectra of the 1 150 nm fiber laser oscillators using different length of gain fiber

达到最高,此时参与激光能级跃迁过程的上下能级粒子数受到的影响较大.

在以上对比实验的基础上,在增益光纤长度为 35 m 的条件下,增加泵浦 LD 功率,进一步提升 1 150 nm 激光振荡器的输出功率.在 30 W 的泵浦功率下,获得了平均输出功率最大为 12.7 W 的 1 150 nm 波段光纤激光,激光振荡器的光光转换效率为 42.3%.其功率输出特性如图 3,激光器的功率输出曲线并未显示出功率饱和趋势,说明该激光器的输出功率仅受限于泵浦功率,如果继续增加泵浦功率,还能够实现更高

功率输出.图 4 为光纤激光振荡器在最大输出功率时的光谱特性曲线.可以看出,该激光器的中心波长为 1 150.48 nm,3 dB 谱线宽度为 0.45 nm,边模抑制比达到 38 dB,未出现 ASE,也没有 976 nm 的泵浦光残余.并且,光谱检测表明,该激光振荡器没有出现寄生激光振荡.在最大的泵浦功率水平下,该激光振荡器能够长时间稳定运行稳定工作(进行过 10 分钟满功率运行测试),熔接点和增益光纤等关键部位也未出现热损伤,系统的输出特性也未发生变化.

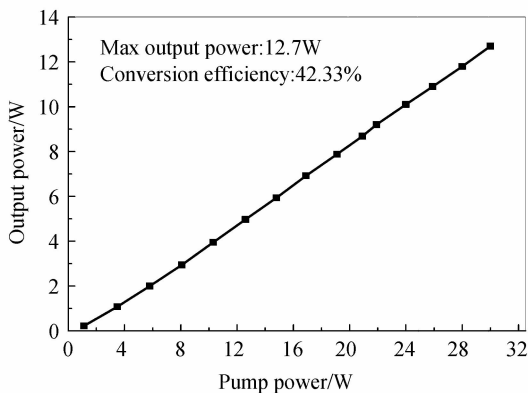


图 3 功率输出特性

Fig. 3 Output power of the 1 150 nm fiber laser oscillator

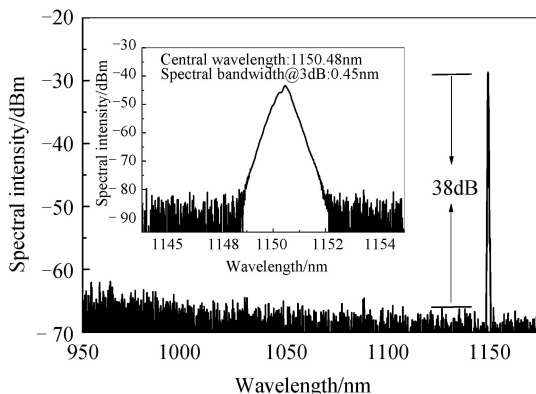


图 4 最大功率时的输出光谱特性

Fig. 4 Spectra of the 1 150 nm fiber laser oscillator under the max output power

采用 Spiricon M2-200S-FW 型光斑分析仪对 1 150 nm 光纤激光振荡器的输出光斑进行测量。测量结果如图 5。可以看出该光纤激光振荡器的输出光斑呈现高斯型强度分布。对于光纤激光器来说,其输出光束质量主要由所用光纤的结构参量决定。本实验采用的双包层光纤的纤芯直径为 10 μm ,纤芯数值孔径为 0.08,对于 1 150 nm 激光,纤芯的归一化频率为 2.185,满足单模传输条件。所以,该光纤激光振荡器的输出应为基模激光,这对于该激光振荡器的后续应用来说是非常有利。从光谱特性和光束质量方面分析,实验搭建的 1 150 nm 波段高功率光纤激光振荡器可满足 3 μm 波段掺钕光纤激光器的高功率泵浦光源等实际应用需求。

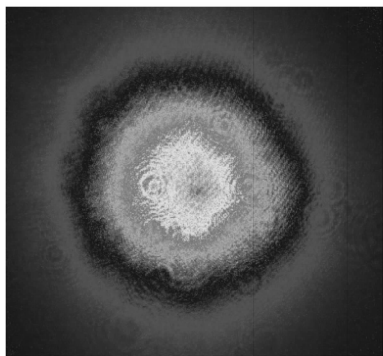


图 5 输出光斑特性

Fig. 5 The output beam of the 1 150 nm fiber laser oscillator

实验搭建的光纤激光振荡器的输出光谱较好,但是其光光转化效率为 42.33%,与文献[18]报道的结果还有一定的差距。由于所搭建的激光振荡器的输出光纤光栅的反射率是根据经验值进行选取的,并未进行优化。尽管较高的输出光纤光栅反射率有利于提供激光信号反馈、抑制寄生激光振荡和 ASE,但是也降低了激光振荡器的功率输出比,导致激光振荡器的效率低下。在实际应用中,可综合考虑激光器输出特性、激光器效率以及激光器成本等因素,合理优化选取增益光纤长度和输出光纤光栅反射率,提升光纤振荡器的综合性能和性价比。

3 结论

以光纤光栅对为激光腔、掺镱光纤为增益介质、976 nm LD 为泵浦源,搭建了全光纤化 1 150 nm 波段长波光纤激光振荡器。对比实验研究表明,对于长波光纤激光振荡器的光学转换效率,增益光纤的长度存在一个最优值。但在一定长度范围内,增益光纤对激光振荡器效率的影响有限。对于增益光纤长度固定的光纤激光振荡器来说,光纤激光振荡器的输出光谱线宽随输出功率的增加而加宽,并且激光中心波长发生红移;然而,在同样的泵浦条件下,增益光纤长度越长,激光振荡器的输出光谱也越宽。同时,光纤激光振荡器的输

出激光光谱的中心波长也与增益光纤长度有关。

选取优化的增益光纤长度,在室温下实现了平均输出功率最大为 12.7 W 的 1 150 nm 波段单模光纤激光输出,激光振荡器的光光转换效率为 43.5%。当最大功率输出时,没有出现放大自发辐射光谱、泵浦光残余和寄生激光振荡,激光光谱的 3 dB 线宽为 0.5 nm,边模抑制比达 38 dB。采用该结构的 1 150 nm 波段光纤激光器仍具备功率提升潜力,可用于 3 μm 波段掺钕光纤激光器的高功率泵浦光源等实际应用。

致谢 感谢国防科学技术大学侯静研究员、陈胜平副研究员和郭森实验员在实验研究方面给予的帮助。

参考文献

- [1] JACKSON S. Towards high-power mid-IR emission from a fiber laser[J]. *Nature Photonics*, 2012, **6**(7): 423-431.
- [2] FORTIN V, BERNIER M, BAH S, *et al.* 30 W fluoride glass all-fiber laser at 2.94 μm [J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(12): 2882-2885.
- [3] SHEN Yan-long, HUANG Ke, ZHU Feng, *et al.* Laser diode-pumped watt-level single mode heavily erbium-doped mid-infrared fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(3): 0314002.
沈炎龙, 黄珂, 朱峰, 等. LD 泵浦瓦级单模高掺铒中红外光纤激光器[J]. *光子学报*, 2014, **43**(3): 0314002.
- [4] MENG Xiang-wei, YAO Chuan-fei, WANG Shan-de, *et al.* $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ co-doped tellurite microstructure fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(1): 94-98.
孟祥伟, 姚传飞, 王善德, 等. $\text{Tm}^{3+}/\text{Ho}^{3+}$ 共掺碲酸盐微结构光纤激光器[J]. *发光学报*, 2015, **36**(1): 94-98.
- [5] SHEN Yan-long, HUANG Ke, ZHOU Song-qing, *et al.* 10 W-level high efficiency single-mode mid-infrared 2.8 μm fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(5): 46-49.
沈炎龙, 黄珂, 周松青, 等. 10 W 级高效率单模中红外 2.8 μm 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2015, **42**(5): 46-49.
- [6] WANG Le-le, LUO Hong-yu, XIE Ji-tao, *et al.* 15 W-level 2.9 μm cascade oscillation radiation mid-infrared Er^{3+} : ZBLAN fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(7): 330-330.
王乐乐, 罗鸿禹, 谢记涛, 等. 15 W 高功率 2.9 μm 中红外级联掺铒 ZBLAN 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2015, **42**(7): 330-330.
- [7] CRAWFORD S, HUDSON D, JACKSON S. High power, broadly tunable 3 μm fiber laser for the measurement of optical fiber loss [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(3): 1502309.
- [8] DONG Shu-fu, MEN Jian, ZHANG Rui, *et al.* 3 μm and 2 μm cascade oscillation radiation in Ho^{3+} : ZBLAN fiber[J]. *Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition)*, 2006, **7**(1): 49-52.
董淑福, 门健, 张锐, 等. Ho^{3+} : ZBLAN 光纤中的 3 μm 与 2 μm 级联振荡辐射[J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2006, **7**(1): 49-52.
- [9] LUO Hong-yu, LI Jian-feng, HE Yu-lian, *et al.* High power 2.97 μm mid-infrared passively Q-switched Ho-doped ZBLAN fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, **41**(2): 0202003.
罗鸿禹, 李剑峰, 何雨莲, 等. 高功率 2.97 μm 中红外被动调 Q 掺钬 ZBLAN 光纤激光器[J]. *中国激光*, 2014, **41**(2):

0202003.

- [10] JACKSON S, BUGGE F, ERBERT G. Directly diode-pumped holmium fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(27): 2496-2498.
- [11] LI J, HUDSON D, LIU Y, *et al.* Efficient 2.87 μm fiber laser passively switched using a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(18): 3747-3749.
- [12] LIU Xiao-juan, FU Sheng-gui, GUO Li-ping, *et al.* MOPA structured 1120 nm Yb-doped all fiber amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0906001.
刘晓娟, 付圣贵, 郭立萍, 等. 基于 MOPA 结构的 1120 nm 掺 Yb 光纤放大器[J]. 光子学报, 2014, **43**(9): 0906001.
- [13] KURKOV A. Oscillation spectral range of Yb-doped fiber lasers[J]. *Laser Physics Letters*, 2007, **4**(2): 93-102.
- [14] KURKOV A, PARAMONOV V, MEDVEDKOV O. Ytterbium fiber laser emitting at 1160 nm[J]. *Laser Physics Letters*, 2006, **3**(10): 503-506.
- [15] SINHA S, URBANEK K, HUM D, *et al.* Linearly polarized, 3.35 W narrow-linewidth, 1 150 nm fiber master oscillator power amplifier for frequency doubling to the yellow [J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(11): 1530-1532.
- [16] JACQUEMENT M, MUGNIER A, CORRE G, *et al.* CW PM multiwatts Yb-doped fiber laser directly emitting at long wavelength [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, **15**(1): 120-128.
- [17] DVOYRIN V, MEDVEDKOV O, SOROKINA T. YDFL operating in 1150 - 1200-nm spectral domain [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2013, **49**(4): 419-425.
- [18] MIAO Y, ZHANG H, XIAO H, *et al.* High-power diode-pumped ytterbium-doped fiber laser at 1 150 nm [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, **12**(9): 091403.
- [19] CHEN Hong-wei, SHEN Yan-long, TAO Meng-meng, *et al.* Experimental investigation of an 1 150 nm fiber laser oscillator [J]. *Modern Applied Physics*, 2015, **6**(4): 254-258.
湛鸿伟, 沈炎龙, 陶蒙蒙, 等. 1 150 nm 波段光纤激光振荡器实验研究 [J]. 现代应用物理, 2015, **6**(4): 254-258.