文章编号 2095-1531(2019)05-1109-09

国产化掺铥光纤激光振荡器性能研究

孟 佳[1,2],张 伟[2,3],赵开祺[1,2],余 婷[2,3*],吴闻迪[2],
于春雷[2],李 璇[2],李兴冀[4],叶锡生[2,3*],曹 清[1]
(1. 上海大学 理学院,上海 200444;
2. 中国科学院 上海光学精密机械研究所 ,上海 201800;
3. 中国科学院大学,北京 100049;
4. 哈尔滨工业大学 空间环境材料行为与评价技术国家级重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:目前,掺铥光纤激光器(TDFL)所使用的材料和器件,特别是增益光纤,多为外国公司所生产,因而,有必要开展基于国产材料和器件的该类激光器研究。本文报道了基于自研增益光纤建立的连续波掺铥光纤激光振荡器的性能。实验中,利用纤芯直径为 10 μm 的自研掺铥光纤、国产泵浦源及光纤光栅搭建了三台振荡器,分别产生了中心波长为 1 918、1 941和 2 013 nm 的激光输出。此外,对国产与进口增益光纤的激光输出特性进行了比较。实验结果表明,与进口光纤相比,自研掺铥光纤在输出效率方面低 6% ~11%,但是光谱线宽保持良好(0.1 nm 左右),且在近场光斑分布方面具有一定优势。

关 键 词:掺铥光纤激光振荡器;国产化光纤材料与器件
中图分类号:TN248 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20191205.1109

Investigation on the performance of a homemade thulium-doped fiber laser oscillator

MENG Jia[1,2], ZHANG Wei[2,3], ZHAO Kai-qi[1,2], YU Ting[2,3*], WU Wen-di[2],
YU Chun-lei[2], LI Xuan[2], LI Xing-ji[4], YE Xi-sheng[2,3*], CAO Qing[1]
(1. *College of Science, Shanghai University, Shanghai* 200444, *China*;
2. *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai* 201800, *China*;
3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
4. *National Key Laboratory of Materials Behavior and Education Technology in Space Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150001, *China*)
* *Corresponding authors: yuting@siom.ac.cn, xsye@siom.ac.cn*

收稿日期:2018-11-27;**修订日期**:2019-01-09
基金项目:中国科学院"百人计划"项目(No. 1505521XR0);空间环境材料行为及评价技术国家级重点实验室基金项目(No. 6142910030613)
Supported by the Hundred-Talent Program of the Chinese Academy of Sciences(No. 1505521XRO); the Foundation of the National Key Laboratory of Materials Behavior and Evaluation Technology in Space Environment(No. 6142910030613)

Abstract: The optical fibers and devices used in thulium-doped fiber lasers(TDFL) are mostly produced by foreign companies. Therefore, it is necessary to develop TDFL based on homemade materials and devices. In this paper, the performance of continuous-wave thulium-doped fiber oscillators using a homemade gain fiber is reported. During the experiment, using a domestic thulium-doped fiber with a core diameter of 10 μm, homemade LD(laser diode) pump sources and fiber gratings, three oscillators were developed to generate laser output with central wavelengths of 1 918 nm, 1 941 nm and 2 013 nm, respectively. In addition, the laser output characteristics of the homemade and imported thulium-doped gain fibers were compared. The experimental results indicate that the output efficiency of the homemade thulium-doped fiber(TDF) is 6 – 11% lower than the imported TDF, but the homemade TDF has a similar spectral linewidth(about 0.1 nm) and a better near-field spot.

Key words: Thulium-Doped Fiber Laser(TDFL) oscillator; homemade optical fiber materials and devices

1 引 言

掺铥光纤激光处于人眼安全波段,可以用于探测大气分子(如 H_2O、CO_2、N_2O 等)并在激光通信、激光雷达、遥感探测、激光医疗等领域有重要应用前景[1-4],近年来受到了较广泛关注。掺铥光纤激光器(Thulium-Doped Fiber Laser,TDFL)可输出 1.8 ~ 2.1 μm 波段的激光,并且在波长大于 2 μm 时可用于泵浦非线性晶体从而产生中红外激光[5-7]。掺铥光纤激光器的应用前景广泛,对于所需材料及器件的研制提出了较高要求,相关技术的进步也推动着掺铥光纤激光器的发展[8-16]。目前单频单模掺铥光纤激光器已实现 608 W 的激光功率输出[17],而高功率掺铥光纤激光器已经实现千瓦级的激光功率输出[18]。国内的相关研究起步较晚,与国外相比还存在较大差距。

目前,常用的商业化掺铥光纤(TDF)主要来自 Nufern、Coactive、iXblue 等国外公司,而振荡器所用的光纤光栅则也主要来自 Teraxion、ITF 等国外公司。目前,对于光纤激光器,与掺镱光纤相比,掺铥光纤的研究成果很少。为此,有必要尽快地发展基于国产材料和器件的掺铥光纤激光器技术。

本文基于国产掺铥光纤、光纤光栅、半导体激光(laser diode,LD)泵浦源等材料和器件,通过设计和搭建 1 918、1 941、2 013 nm 3 种连续波掺铥光纤激光振荡器并进行性能测试分析,研究掺铥光纤在不同输出激光波长下的转化效率、输出光谱及近场光斑等输出特性,并与进口的商业化光纤输出特性进行对比。

2 理论模型

2.1 掺铥光纤激光振荡器基本原理

掺铥光纤激光振荡器以掺铥光纤作为增益介质,其工作原理表述如下:将泵浦光注入掺铥光纤中,纤芯内的铥离子吸收泵浦光跃迁至上能级,并随着上能级粒子数的增多而产生粒子数反转;处于激发态的铥离子再次跃迁至基态能级时

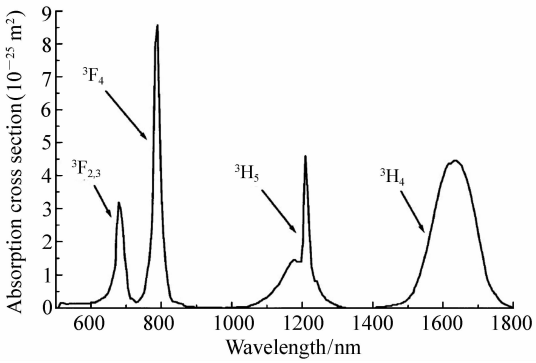


图 1 铥离子的吸收光谱

Fig. 1 Absorption spectrum of the thulium ions

会辐射出波长为 2 μm 波段的光子,并在谐振腔内受激放大、辐射出 2 μm 波段激光。图 1 为铥离子的吸收光谱[19],可见,铥离子(Tm^{3+})在 790 nm 附近的光吸收最强。本实验采用技术较为成熟的激光波长为 793 nm 的 LD 作为泵浦源。

2.2　数值模拟

铥离子的能级结构如图 2 所示[19],图中右侧括号内所标注的为各能级寿命(单位为 μs)。由于$^3H_5$能级的寿命极短,只有 0.007 μs,故该能级上的粒子数可以忽略。因此,利用 793 nm 激光泵浦的掺铥光纤激光器为准三能级系统。位于基态$^3H_6$能级的 Tm^{3+} 离子在吸收波长为 793 nm 的泵浦光之后被激发到$^3H_4$能级,经过光子自猝灭过程衰变到$^3F_4$能级,同时辐射出光子,将$^3H_6$能级的粒子激发到$^3F_4$能级,$^3F_4$能级上的 Tm^{3+} 离子向基态跃迁并发射 2 μm 波段的激光。

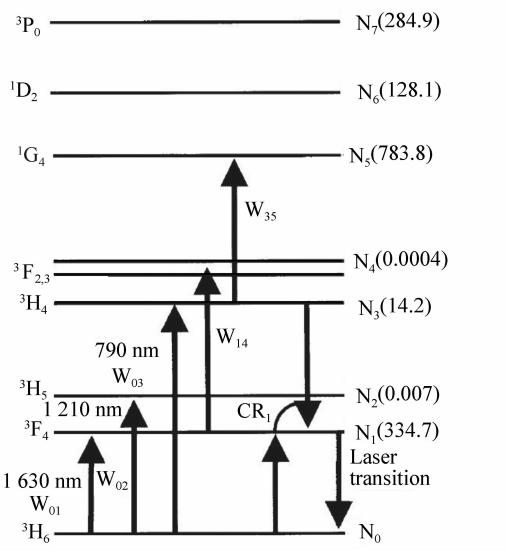


图 2　铥离子的能级分布及其寿命

Fig. 2　Energy-level distribution of thulium ions and their lifespans

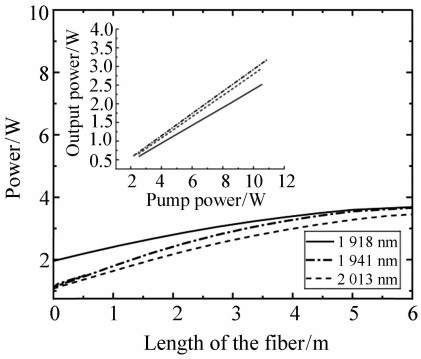
振荡器中泵浦光、信号光光子数密度沿光纤长度变化的输运方程由以下公式给出[19]:

$$\begin{cases}
\dfrac{\mathrm{d}\phi_p^+(z)}{\mathrm{d}z} = -\Gamma_p[\sigma_{ap}N-(\sigma_{ap}+\sigma_{ep})N_2(z)]\phi_p^+(z)-\alpha_p\phi_p^+(z)\\
\dfrac{\mathrm{d}\phi_p^-(z)}{\mathrm{d}z} = \Gamma_p[\sigma_{ap}N-(\sigma_{ap}+\sigma_{ep})N_2(z)]\phi_p^-(z)+\alpha_p\phi_p^-(z)\\
\dfrac{\mathrm{d}\phi_s^+(z)}{\mathrm{d}z} = \Gamma_s[(\sigma_{es}+\sigma_{as})N_2(z)-\sigma_{as}N]\phi_s^+(z)+\Gamma_s\sigma_{es}N_2(z)\phi_0-\alpha_s\phi_s^+(z)\\
\dfrac{\mathrm{d}\phi_s^-(z)}{\mathrm{d}z} = -\Gamma_s[(\sigma_{es}+\sigma_{as})N_2(z)-\sigma_{as}N]\phi_s^-(z)-\Gamma_s\sigma_{es}N_2(z)\phi_0+\alpha_s\phi_s^-(z)\\
\dfrac{N_2(z)}{N} = \dfrac{[\phi_p^+(z)+\phi_p^-(z)]\sigma_{ap}\Gamma_p+[\phi_s^+(z)+\phi_s^-(z)]\sigma_{as}\Gamma_s}{[\phi_p^+(z)+\phi_p^-(z)](\sigma_{ap}+\sigma_{ep})\Gamma_p+\dfrac{1}{c\tau}+[\phi_s^+(z)+\phi_s^-(z)](\sigma_{as}+\sigma_{es})\Gamma_s}
\end{cases}$$

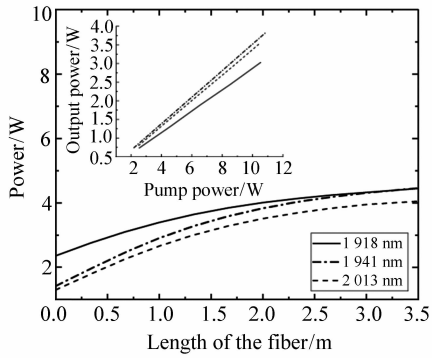
式中,ϕ_p^+、ϕ_p^-、ϕ_s^+、ϕ_s^- 分别为前、后向泵浦光及信号光光子数密度,ϕ_0 为自发辐射对信号光光子数密度的贡献,Γ_p 和 Γ_s 分别为掺铥光纤对泵浦光和信号光的功率填充因子,σ_{ap}和 σ_{ep}分别是泵浦光的吸收截面和发射截面,σ_{as}和 σ_{es}是信号光的吸收截面和发射截面,N 为纤芯中增益介质 Tm 的掺杂浓度,$N_2(z)$为增益介质 Tm 的上能级离子浓度。τ 为 Tm 粒子上能级平均寿命,h 为普朗克常数,ν_p 和 ν_s 分别为泵浦光及信号光的频率,α_p 和 α_s 分别为增益光纤对泵浦光和信号光的散射损耗,泵浦光、信号光功率可表示为 $P_m = ch\nu_m A_c\phi_m$($m=p$ 或 s,p 表示泵浦光,s 表示信号光),A_c 为纤芯截面积。

联立以上各式,用 Matlab 软件对微分方程组进行求解,可给出所需光纤的长度。本文数值模拟工作中关键参数的取值为:$\lambda_{pump}=793$ nm,$\sigma_{as}=1\times10^{-26}$ m^2,$\sigma_{ap}=8\times10^{-25}$ m^2,$\sigma_{es1918}=5\times10^{-25}$ m^2,$\sigma_{es1941}=4.5\times10^{-25}$ m^2,$\sigma_{es2013}=3\times10^{-25}$ m^2,$\sigma_{ep}=1\times10^{-25}$ m^2,$A_c=7.853\ 8\times10^{-11}$ m^2,$\alpha_p=4\times10^{-3}$/m,$\alpha_s=7\times10^{-4}$/m,$\Gamma_p=0.002\ 4$,$\Gamma_s=0.82$,$P_{p1918}=10.52$ W,$P_{p1941}=10.88$ W,$P_{p2013}=10.40$ W。光纤光栅的参数则根据所用器件的参数设定。1 918、1 941、2 013 nm 振荡器前向信号光功率随光纤长度变化、输出信号光功率

随泵浦光功率变化的数值模拟结果如图 3 所示。由图 3 可知，当自研增益光纤的长度为 5 m 时，输出激光功率趋于饱和，1 918、1 941、2 013 nm 振荡器在设定泵浦功率下输出分别为 2.52、3.19、2.92 W，光-光转化效率分别为 24.0%、29.3%、28.1%。进口增益光纤在长度为 3 m 时输出功率趋于饱和；在此光纤长度下，1 918、1 941 及 2 013 nm 振荡器输出的激光功率分别为 3.03、3.84 及 3.52 W，对应光光转化效率分别为 28.8%、35.3% 及 33.8%。



(a) 基于国产掺铥光纤的数值模拟结果
(a) Simulation results based on homemade TDF



(b) 基于进口掺铥光纤的模拟结果
(b) Simulation results based on imported TDF

图 3 掺铥光纤激光器数值模拟结果

Fig. 3 Simulation results of thulium-doped fiber lasers

3 实验装置

国产化连续波掺铥光纤振荡器的原理结构如图 4 所示。泵浦源使用国产半导体二极管(BWT，凯普林)，其中心波长为 793 nm，最大输出功率为 16 W，输出尾纤纤芯/包层直径为 105/125 μm。泵浦源熔接 FBG 后进入增益介质。FBG 及增益介质皆为中国科学院上海光学精密机械研究所自主研发。FBG 的纤芯/包层直径为 10/130 μm，参数如表 1 所示。增益介质是纤芯/包层直径为 10/130 μm 的单模掺铥光纤，其对 793 nm 泵浦激光的包层吸收系数为 ~2.5 dB/m，光纤长度为 5 m。掺铥光纤盘绕在水冷板上进行主动散热。振荡器输出的激光经过包层光功率滤除器(Cladding Power Stripper，CPS)后包层内残余的激光被滤除。为了防止菲涅尔反射光损伤前端器件，将激光输出端面切割为 8°斜角。

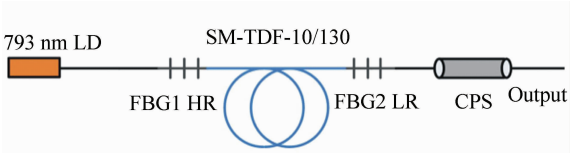


图 4 掺铥光纤激光振荡器原理结构

Fig. 4 Schematic of the thulium-doped fiber laser oscillator

表 1 光纤布拉格光栅参数表

Tab. 1 Parameters of the FBGs

Code	HR	LR
1	λ_c[①] = 1 917.78 nm, $\Delta\lambda$[②] = 1.2 nm, R[③] > 99%	λ_c = 1 917.81 nm, $\Delta\lambda$ = 0.08 nm, R≈10%
2	λ_c = 1 941.42 nm, $\Delta\lambda$ = 1.1 nm, R > 99%	λ_c = 1 941.67nm, $\Delta\lambda$ = 0.11 nm, R≈30%
3	λ_c = 2 013.34 nm, $\Delta\lambda$ = 0.84 nm, R > 99%	λ_c = 2 013.34 nm, $\Delta\lambda$ = 0.16 nm, R≈11%

Notes: ①λ_c is the central wavelength; ②$\Delta\lambda$ is the linewidth; ③R is the reflectivity.

4 实验结果及分析

4.1 基于自研增益光纤的振荡器实验结果

实验分别使用表 1 中的 3 对光纤光栅、自研掺铥光纤以及国产 LD 泵浦源搭建振荡器，对振荡器的输出激光功率及光谱进行测试，典型结果见图 5。

振荡器输出激光功率与泵浦源 LD 功率的关系曲线如图 5(a)所示,可见:输出激光功率与泵浦光功率基本呈线性变化,但输出激光波长不同时的斜率效率略有不同。

在 1 918 nm 振荡器实验中,当泵浦源输出功率为 10.52 W 时,输出激光功率为 2.38 W,斜率效率为 28.0%,光-光转化效率为 22.6%,激光中心波长为 1 917.80 nm(光谱仪型号为 YOKOGAWA AQ6375),3 dB 谱宽为 0.08 nm,见图 5(b)。

在 1 941 nm 振荡器实验中,输出信号光功率为 2.95 W(对应泵浦光功率为 10.88 W),斜率效率为 31.8%,光-光转化效率为 27.1%,中心波长为 1 941.75 nm,3 dB 谱宽为 0.09 nm,见图 5(c)。

在 2 013 nm 振荡器实验中,当泵浦源 LD 输出功率为 10.40 W 时,信号光的输出功率达 2.92 W,斜率效率达 29.1%,光-光转化效率为 28.0%,激光中心波长为 2 013.38 nm,3 dB 谱宽为 0.1 nm,见图 5(d)。

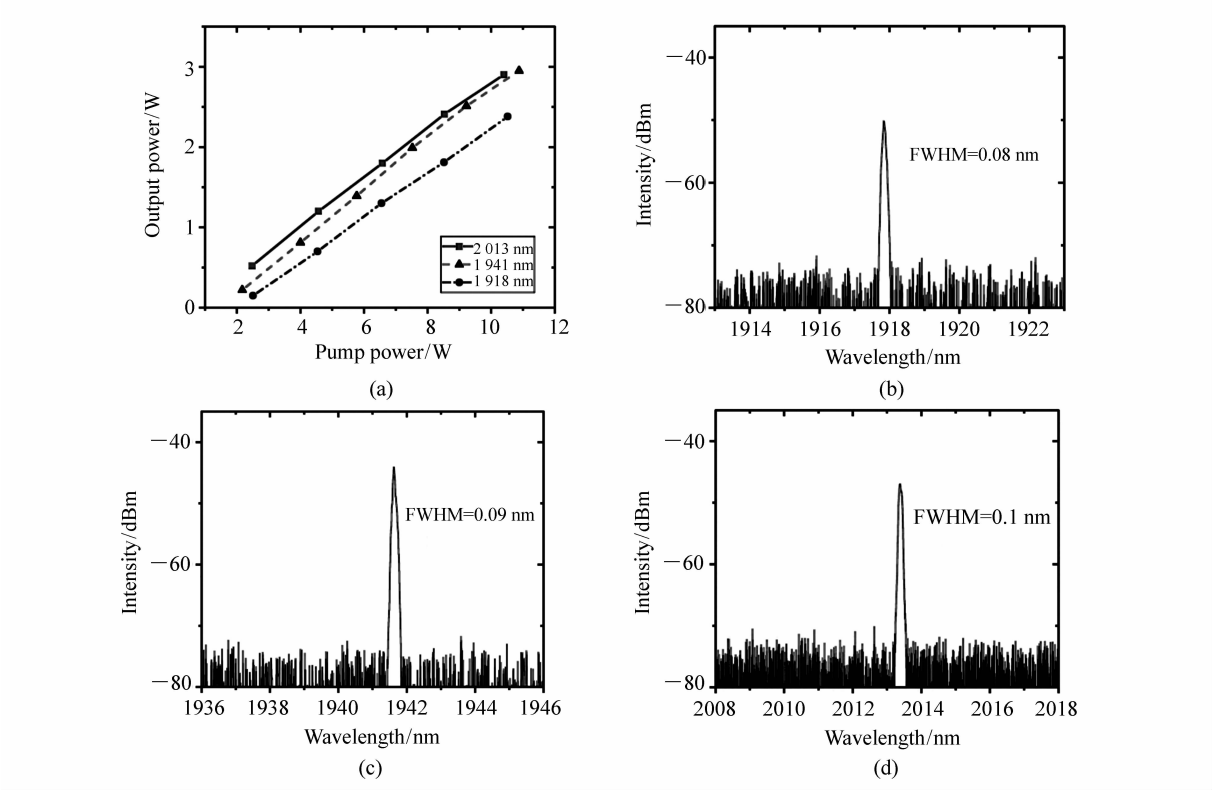


图 5　国产化掺铥光纤激光振荡器输出功率和光谱实验结果。(a)信号光功率与泵浦功率的关系;(b)~(d)1 918 nm、1 941 nm 和 2 013 nm 振荡器的光谱

Fig. 5　Experimental results of output power and spectra of the domestic thulium-doped fiber laser oscillators. (a) Relationship between signal power and pump power; (b) ~ (d) spectra of 1 918 nm, 1 941 nm and 2 013 nm oscillators

实验中 1 918 nm 振荡器的效率与 1 941 nm、2 013 nm 振荡器存在较大的差距。经验证发现,这是由于 1 918 nm 的高反光栅对泵浦光损耗较高(约 19%)引起的;在对 1 918 nm 振荡器理论数值模拟时也考虑了该器件的损耗。可见,实验结果与模拟结果的一致性较好。

在光纤研制过程中,通过调整纤芯内铥离子的掺杂浓度、纤芯外围锗层中锗的掺杂浓度,改变增益光纤数值孔径,可在一定程度上优化激光光斑。本实验所用的自研增益光纤在研制时通过减小铥离子掺杂浓度、增加锗层中锗的掺杂浓度而适当减小了其数值孔径(约为 0.145)。使用 PY-

IV 相机对各振荡器输出激光的近场光斑进行测量,结果如图 6 所示。可见,各振荡器输出激光的近场光斑能量分布比较规则。

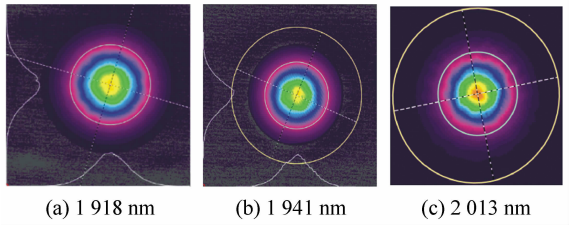


图 6 国产化掺铥光纤振荡器输出激光的近场光斑分布

Fig. 6 Near-field spots of output laser from the domestic thulium-doped fiber oscillators

基于 2 013 nm 振荡器,分别对使用 2、3、5 m 增益光纤的情况进行了输出激光功率测试,结果如图 7 所示。可见,在输出效率方面,增益光纤长度为 5 m 时要优于另外两个长度,所得结果与模拟结果较吻合。

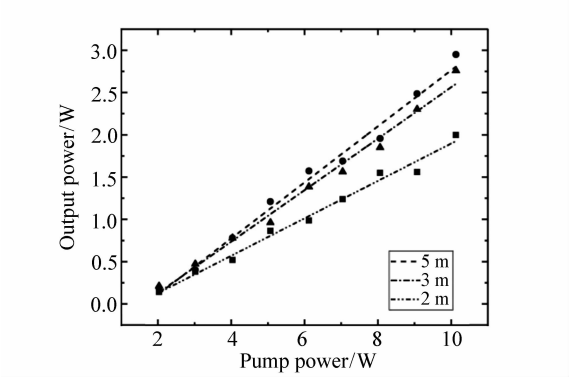


图 7 不同增益光纤长度下输出激光功率与泵浦光功率之间的关系

Fig. 7 Relationship between output laser power and pump power under different gain fiber lengths

针对 2 013 nm 振荡器在输出激光功率为3 W 的条件下进行了时长约 60 min 的运行考核,结果如图 8 所示。可见,激光功率波动为 ±0.08 W,其稳定性良好(功率波动呈现一定的周期性,具体原因待进一步研究)。

对 2 013 nm 振荡器采用最高功率为 30 W 的泵浦源,其激光输出情况如图 9 所示。当泵浦功率处于 11 W 和 15 W 附近时,振荡器出现了输出功率下降的现象,具体原因有待进一步研究。

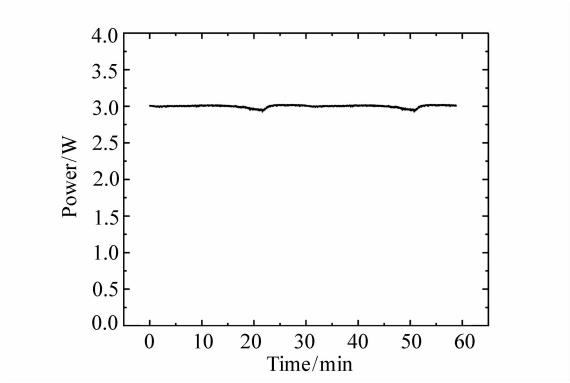


图 8 60 min 内掺铥光纤激光器功率稳定性

Fig. 8 Stability of output power of TDFL in 60 min

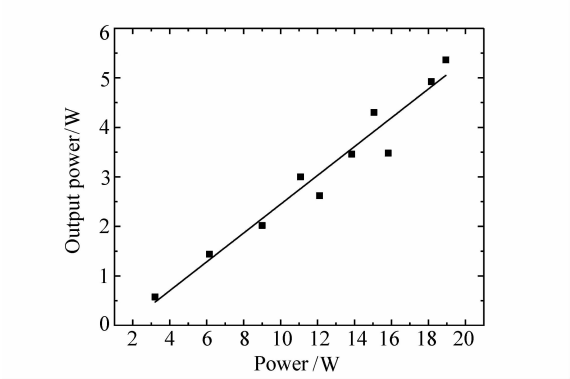


图 9 更高泵浦功率下的功率输出曲线

Fig. 9 Relationship between signal power and pump power with higher pump power

4.2 对比实验

将上述激光振荡器中的增益介质分别替换为进口的 Nufern 公司双包层单模掺铥光纤产品(其纤芯/包层直径同样为 10/130 μm,包层对 793 nm 泵浦光的吸收系数为 4.5 dB/m,数值孔径为 0.15,光纤长度为 2.8 m),再测试其激光输出特性,并与自研的掺铥光纤进行对比。

在换用进口掺铥光纤之后,激光振荡器输出功率曲线如图 10 所示,对比数据见表 2。实验与模拟结果在趋势上仍较一致。结合图 7 可见,利用进口光纤,激光输出效率较国产光纤有明显提升,斜率效率相差 6% ~11% 左右。由表 2 结果可见,基于自研掺铥光纤的振荡器在激光输出功率、斜率效率、光-光效率方面与进口光纤相比尚有一定的差距,而在线宽方面则基本一致。分析

推测自研掺铥光纤在功率、效率上的差异与增益光纤离子掺杂浓度等有关,有待进一步实验研究以改善其性能。

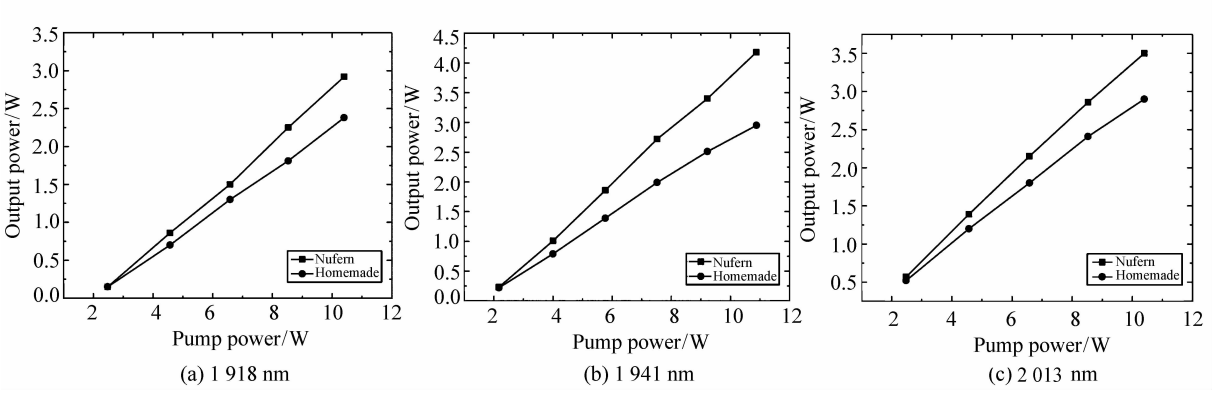


图 10　采用进口和国产掺铥光纤的激光振荡器输出功率对比实验结果

Fig. 10　Contrast experimental results of the output powers of laser oscillators by using the domestic and imported TDFs

表 2　采用进口和国产掺铥光纤的激光振荡器的输出效率和光谱特性

Tab. 2　Output efficiencies and spectral characteristics of the laser oscillators by using the domestic and imported TDFs

光纤	中心波长/nm	输出功率/W	泵浦功率/W	斜率效率/%	光-光转化效率/%	线宽/nm
进口	1 918.00	2.92	10.52	34.6	27.7	0.09
国产	1 917.80	2.38	10.52	28.0	22.6	0.08
进口	1 941.72	3.96	10.88	43.1	36.3	0.10
国产	1 941.75	2.95	10.88	31.8	27.1	0.09
进口	2 013.33	3.50	10.40	37.0	33.7	0.09
国产	2 013.38	2.92	10.40	29.1	28.0	0.10

换用进口掺铥光纤后,激光振荡器的近场光斑如图 11 所示。与图 6 中自研掺铥光纤的结果相比,采用进口光纤的激光输出光斑能量分布不太理想,而自研掺铥光纤的激光输出光斑分布则较为理想。

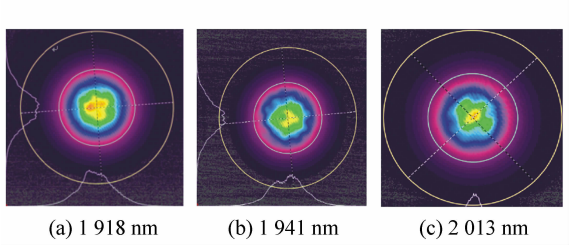


图 11　进口掺铥光纤振荡器输出激光的近场光斑分布

Fig. 11　Near-field spots of the output laser from oscillators by using the imported thulium-doped fiber

5　结　论

本文利用国产化的材料和器件成功搭建了 1 918、1 941、2 013 nm 掺铥光纤激光振荡器,开展了自研掺铥光纤的激光输出特性研究。3 台振荡器的激光输出光谱良好,3 dB 谱宽均接近 0.1 nm。对自研掺铥光纤在数值孔径方面进行了优化,使激光输出近场光斑分布较理想。

接着,将增益介质替换为进口掺铥光纤,开展了激光器特性的对比测试分析。结果表明,在激光输出的功率、斜率效率、光-光效率方面,自研掺铥光纤接近于进口产品,但仍存在一定差距,而自研掺铥光纤在激光振荡器输出近场光斑分布方面明显好于进口光纤。

致谢:感谢上海光学精密机械研究所皮浩洋、杨依枫、张晨、王孟等同志在实验方面提供了帮助和支持。

参考文献：

[1] SCHOLLE K, LAMRINI S, KOOPMANN P, *et al*.. 2 μm *Laser Sources and Their Possible Applications*[M]. PAL B. Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics. Vukovar, Croatia: InTech, 2010.

[2] 顾宏灿，黄俊斌，程玲，等. 20～1 250 Hz 光纤激光加速度传感系统设计[J]. 中国光学，2017，10(4)：469-476.
GU H C, HUANG J B, CHENG L, *et al*.. 20 – 1 250 Hz fiber laser acceleration sensing system[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 469-476. (in Chinese)

[3] 张姝，何芳，孙伟丽，等. 应用2 μm 铥(Tm)激光器行前列腺手术的护理[J]. 全科护理，2012，10(36)：3401-3403.
ZHANG SH, HE F, SUN W L, *et al*.. Nursing care of prostate surgery using 2 μm thulium laser[J]. *Chinese General Practice Nursing*, 2012, 10(36): 3401-3403. (in Chinese)

[4] 李充，谢冀江，潘其坤，等. 中红外光学参量振荡器技术进展[J]. 中国光学，2016，9(6)：615-624.
LI CH, XIE J J, PAN Q K, *et al*.. Progress of mid-infrared optical parametric oscillator[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 615-624. (in Chinese)

[5] WU J F, YAO ZH D, ZONG J, *et al*.. Highly efficient high-power thulium-doped germanate glass fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(6): 638-640.

[6] 刘茵紫，邢颖滨，徐中巍，等. 高功率掺铥石英光纤激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展，2018，55(5)：050004.
LIU Y Z, XING Y B, XU ZH W, *et al*.. Research progress in high power Tm^{3+}-doped silica fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 050004. (in Chinese)

[7] 顾友. 稀土元素铥及其应用[J]. 稀土信息，2006(1)：20-21.
GU Y. Thulium and its applications[J]. *Rare Earth Information*, 2006(1): 20-21. (in Chinese)

[8] SNITZER E. Optical master action of Nd^{3+} in a barium crown glass[J]. *Physical Review Letters*, 1961, 7(12): 444-446.

[9] KAO K C, HOCKHAM G A. *Dielectric Fibre Surface Waveguide for Optical Frequencies*[M]. BROWN J. Electromagnetic Wave Theory. Amsterdam: Elsevier, 1967: 441-444.

[10] KAPRON F P, KECK D B, MAURER R D. Radiation losses in glass optical waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 1970, 17(10): 423-425.

[11] POOLE S B, PAYNE D N, FERMANN M E. Fabrication of low-loss optical fibres containing rare-earth ions[J]. *Electronics Letters*, 1985, 21(17): 737-738.

[12] SNITZER E, PO H, HAKIMI F, *et al*.. Double clad, offset core Nd fiber laser[C]. Proceedings of the Optical Fiber Sensors, OSA, 1988.

[13] HILL K O, FUJII Y, JOHNSON D C, *et al*.. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647-649.

[14] MELTZ G, MOREY W W, GLENN W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method [J]. *Optics Letters*, 1989, 14(15): 823-825.

[15] BOCK W J, WOLINSKI T R, BARWICZ A. Development of a polarimetric optical fiber sensor for electronic measurement of high pressure[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1990, 39(5): 715-721.

[16] PEYRILLOUX A, HARTIER T, HIDEUR A, *et al*.. Theoretical and experimental study of the birefringence of a photonic crystal fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(2): 536-539.

[17] GOODNO G D, BOOK L D, ROTHENBERG J E. Low-phase-noise, single-frequency, single-mode 608 W thulium fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(8): 1204-1206.

[18] EHRENREICH T, LEVEILLE R, MAJID I, *et al*.. 1-kW, all-glass Tm: fiber laser[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7580: 758016.

[19] JACKSON S D, KING T A. Theoretical modeling of Tm-doped silica fiber lasers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, 17(5): 948-956.

作者简介:

孟　佳(1993—),男,河北唐山人,硕士研究生,2015 年于东华大学获得学士学位,现为上海大学与中国科学院上海光学精密机械研究所联合培养硕士研究生,主要从事光纤激光器及中红外激光器方面的研究。E-mail: mengjia_sh@126.com

叶锡生(1967—),男,江苏泰兴人,博士,研究员,1989 年、1997 年于浙江大学分别获得学士、博士学位,主要从事激光技术、激光与物质相互作用等方面的研究。Email: xsye@siom.ac.cn

余　婷(1977—),女,福建福州人,博士,高级工程师,2011 年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事激光技术及非线性频率转换方面的研究。E-mail: yuting@siom.ac.cn

《发 光 学 报》

—EI 核心期刊(物理学类;无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于 1980 年创刊,曾于 1992 年,1996 年,2000 年和 2004 年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为"物理学类核心期刊",并于 2000 年同时被评为"无线电电子学、电信技术类核心期刊"。2000 年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和"万方数据资源系统"等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自 1999 年;美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自 2000 年;美国《剑桥科学文摘社网站》自 2002 年;日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自 2003 年已定期收录检索该刊论文;2008 年被荷兰"Elsevier Bibliographic Databases"确定为源期刊;2010 年被美国"EI"确定为源期刊。2001 年在国家科技部组织的"中国期刊方阵"的评定中,《发光学报》被评为"双效期刊"。2002 年获中国科学院 2001~2002 年度科学出版基金"择重"资助。2004 年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大,主要反映本学科专业领域的科研和技术成就,及时报道国内外的学术动态,开展学术讨论和交流,为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自 2011 年改为月刊,A4 开本,144 页,国内外公开发行。国内定价:40 元,全年 480 元,全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用,踊跃投稿。

地　址: 长春市东南湖大路 3888 号
《发光学报》编辑部
邮　编: 130033
电　话: (0431)86176862, 84613407
E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/O4
国际标准刊号: ISSN 1000-7032
国内邮发代号: 12-312
国外发行代号: 4863BM
http:// www.fgxb.org