

文章编号: 1000-7032(2024)10-1716-08

基于非线性偏振旋转效应的双波长可切换掺铥光纤激光器

王鹏飞, 延凤平*, 于晨昊, 杨丹丹

(北京交通大学 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要: 提出并实现了一种基于重叠光纤光栅(Superimposed fiber Bragg grating, SI-FBG)和非线性偏振旋转效应(Nonlinear polarization rotation, NPR)的双波长掺铥光纤激光器(Thulium-doped fiber laser, TDFL)。两个SI-FBG作为波长选择器件, SI-FBG1的透射中心波长分别为1 940.48 nm和1 942.87 nm, SI-FBG2的透射中心波长分别为1 940.47 nm和1 942.83 nm。利用NPR效应抑制激光器谐振腔内的增益竞争, 实现了稳定的单波长与双波长激光。实验测得可切换的单波长输出分别为1 940.47 nm和1 942.87 nm, 光信噪比均高于37.1 dB, 50 min内的波长漂移和功率波动均小于0.1 nm和0.67 dB。此外, 通过调节谐振腔内的偏振控制器(Polarization controller, PC)可以实现1 940.47 nm和1 942.87 nm两个波长同时输出, 两波长光信噪比均大于15.3 dB, 未在光谱仪监测过程中发现明显的波长变化, 功率波动均小于0.63 dB。

关键词: 掺铥光纤激光器; 重叠光纤光栅; 非线性偏振旋转

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240174

Dual-wavelength-switchable Thulium-doped Fiber Laser Utilizing Nonlinear Polarization Rotation Effect

WANG Pengfei, YAN Fengping*, YU Chenhao, YANG Dandan

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

* Corresponding Author, E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn

Abstract: A dual-wavelength thulium-doped fiber laser based on superimposed fiber Bragg grating (SI-FBG) and nonlinear polarization rotation (NPR) effect is proposed and demonstrated. Two SI-FBGs were used as wavelength-selective devices, and the central wavelengths of transmission spectrum were 1 940.48 nm and 1 942.87 nm for SI-FBG-1, and those of SI-FBG-2 were 1 940.47 nm and 1 942.83 nm, respectively. Stable single-wavelength and dual-wavelength operations were realized by suppressing the gain competition in the laser resonant cavity based on the NPR effect. Experimentally, the switchable single-wavelength operation was determined to be 1 940.47 nm and 1 942.87 nm, respectively. The optical signal-to-noise ratio was higher than 37.1 dB and the wavelength drifts and power fluctuations were less than 0.1 nm and 0.67 dB within 60-min, respectively. In addition, the simultaneous output of 1 940.47 nm and 1 942.87 nm was attained by adjusting the polarization controller (PC) in the resonant cavity. There were no obvious wavelength shifts during the test, and the power fluctuations were less than 0.6 dB.

Key words: thulium-doped fiber laser; superimposed fiber Bragg grating; nonlinear polarization rotation

1 引 言

掺铥光纤激光器(TDFL)因其波长覆盖范围广、光光转换效率高、光束质量好、结构紧凑、成本可控等优势成为近年来光纤激光器研究领域的热

点,在自由空间光通信、激光医疗、风速探测、光纤传感、特种塑料工业加工等领域有着广泛应用^[1-9]。

近年来,2 μm 波段激光研究成果频出。2014年, Geng等总结了在2 μm 波段运行的有关光纤激光器的进展和潜在应用^[10]。在光参量振荡

收稿日期: 2024-07-22; 修订日期: 2024-08-12

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2800900); 国家自然科学基金重点项目(62335001)

Supported by National Key Research and Development Program of China (2021YFB2800900); Key Program of the National Natural Science Foundation of China(62335001)

器中,处于 $2\ \mu\text{m}$ 波段的脉冲激光器会比 $1\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 的更适合用作泵浦源;另外一个新兴应用是产生中红外超连续谱。2016年,华中科技大学 Yang 等报道了一种基于可饱和吸收体和自注入锁定的 $2\ \mu\text{m}$ 双波长单纵模 (SLM) 光纤激光器^[11]。2018年, Qi 等报道了一种基于 $1\ 992.6\ \text{nm}$ 波段高功率窄线宽全光纤单频分布式布拉格主振荡器和功率放大器^[12]。2020年, Ahmad 等提出了一种面向 $1.8\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 的 TDFL^[13],通过调整腔体内的可调谐带通滤波器来实现双波长激光的调谐,从而获得稳定的双波长激光,调谐范围为 $183.6\ \text{nm}$ 。2021年, Zhang 等报道了一种基于复合环腔滤波器的多波长可切换 TDFL,实现了六通道单波长可切换单纵模激光^[14]。2022年, Mamuti 等使用 $2\ \mu\text{m}$ 波段 TDFL 对微米/纳米粒子进行了光热泳捕获^[15]。同年,陶蒙蒙等设计并开展了基于多通道可调谐掺铥光纤激光器 $2\ \mu\text{m}$ 波段水的超光谱吸收测量实验,测量结果与温湿度计和热电偶测量结果相吻合^[16]。多通道输出的光纤激光器是重要的通信和传感光源,在密集波分复用、分布式光学传感、引力波探测等领域有重要的应用价值。实现多波长输出的技术包括均匀光纤光栅、移频器、梳状滤波器、马赫-曾德尔干涉仪、SMS 干涉仪、带通滤波器、啁啾光纤布拉格光栅 (CFBG) 等,也可利用非线性偏振旋转 (NPR) 效应、非线性光纤环镜 (NOLM)、非线性放大环镜 (NALM) 等非线性效应。基于上述理论与实验研究,借助重叠光纤光栅 (SI-FBG) 来设计 $2\ \mu\text{m}$ 波段 DWFL 是一个可取的思路。重叠光纤光栅可由相位掩模法制成,多个不同中心波长的反射通道可以帮助选波滤波,构建波长可调谐激光器谐振腔。

本文提出并验证了一种基于 SI-FBG 和 NPR 效应的双波长可切换 TDFL,理论分析了 NPR 效应的原理,分析并仿真计算了双向泵浦下掺铥光纤 (Thulium-doped fiber, TDF) 内的功率分布情况。所设计的 TDFL 可在 $1\ 940.47\ \text{nm}$ 和 $1\ 942.87\ \text{nm}$ 处实现稳定的单波长激光,谐振腔内采用的 NPR 结构有效抑制了两个波长的增益竞争,实现了稳定的双波长激光。实验结果表明,该 TDFL 具有较好的波长和功率稳定性,在光纤传感系统中具有潜在的应用价值。

2 实验结构和仿真分析

2.1 实验结构

图 1 所示为在实验室恒温恒湿条件下搭建的基于 SI-FBG 和 NPR 效应的 TDFL 结构示意图与实物图,使用的增益介质为一段长度 $1.8\ \text{m}$ 的商用双包层 TDF (Nufern, TDF-10P/130-E)。TDF 的两端分别与两个 $793/2\ 000\ \text{nm}$ 光纤合束器 (Fiber combiner, FC) 相连,中心波长为 $793\ \text{nm}$ 的泵浦光通过 FC 的输入端口注入激光器谐振腔内。FC 2 后连接有光纤隔离器 (Isolator, ISO) 和光纤环形器 (Circulator, CIR),保证激光在谐振腔内单向传输。两个 SI-FBG 通过一个分光比为 $50:50$ 的 2×2 光纤耦合器 (Optical fiber coupler, OC) 与 CIR 的 2 端口相接,作为激光器的波长选择装置。NPR 结构与 CIR 的 3 端口相连,抑制谐振腔内的增益竞争。最后,谐振腔内接入一个分光比为 $20:80$ 的 2×2 OC 2 作为激光输出端口, 80% 的光继续耦合进入谐振腔内参与振荡, 20% 的光经 OC 2 输出用于监测分析。图 1(a) 中, Polarizer 为 NPR 部件中的光纤起偏器, PC 1 和 PC 2 均为 NPR 部件中的偏振控制器。

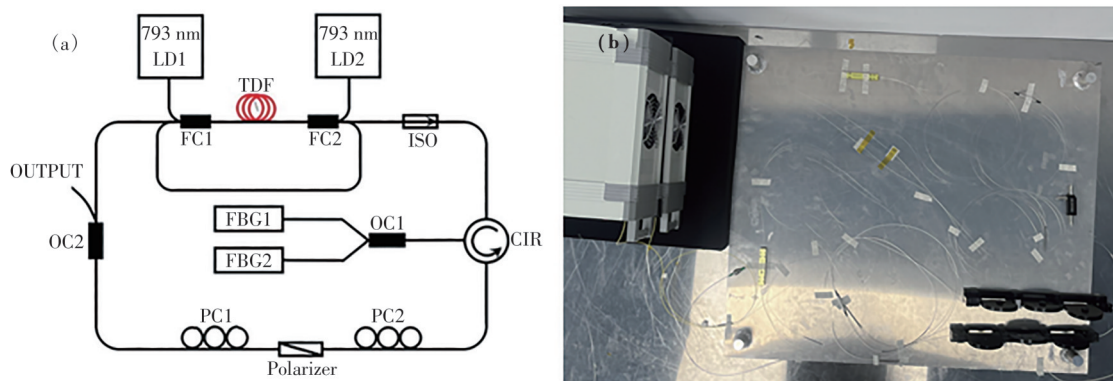


图 1 (a)激光器结构图;(b)激光器实物图

Fig.1 (a) Experimental setup of the proposed fiber laser. (b) Picture of real products

2.2 SI-FBG 光谱特性

TDFL的波长选择装置为两个不同的SI-FBG,其透射特性如表1所示。SI-FBG1的透射峰位于1 940.48 nm和1 942.87 nm,两个通道的3 dB带宽

分别为0.269 nm和0.360 nm,反射率分别为94.39%和98.83%。SI-FBG2的透射峰位于1 940.47 nm和1 942.83 nm,两个通道的3 dB带宽分别为0.244 nm和0.354 nm,反射率分别为93.85%和98.74%。

表1 重叠光纤光栅特性参数

Tab. 1 Critical parameters of SI-FBGs

SI-FBG	通道1			通道2		
	中心波长/nm	3 dB带宽/nm	反射率/%	中心波长/nm	3 dB带宽/nm	反射率/%
1	1 940.48	0.269	94.39	1 942.87	0.360	98.83
2	1 940.47	0.244	93.85	1 942.83	0.354	98.74

2.3 非线性偏振旋转效应

实验中采用的NPR结构由两个PC和一个起偏器(Polarizer, Pol)构成,如图2所示,其透过率 T 可以表示为:

$$T = \frac{|E''|^2}{|E|^2} = \cos^2 \alpha_1 \cos^2 \alpha_2 + \sin^2 \alpha_1 \sin^2 \alpha_2 + \frac{1}{2} \sin 2\alpha_1 \sin 2\alpha_2 \cos(\Delta\phi_L + \Delta\phi_{NL}), \quad (1)$$

其中 α_1 和 α_2 分别为PC 1和PC 2控制的偏振旋转角度,分别表示线性相移和非线性相移,可以表示为:

$$\Delta\phi = 2\pi\Delta nL/\lambda, \quad (2)$$

$$\Delta\phi_{NL} = 2\pi n_2 PL \cos(2\theta)/\lambda A_{\text{eff}}, \quad (3)$$

其中 Δn 为非线性光纤快慢轴折射率差, L 为非线性光纤长度, λ 为信号光波长, P 为输入信号光的

瞬时功率, A_{eff} 为光纤有效模式面积。由上述公式可知,固定PC 1和PC 2偏振角度,NPR的透过率为随信号光瞬时功率变化的正弦曲线。同一瞬时功率下,两个偏置角度改变后,某一特定波长的光在传输时,其功率损耗一般不会相同,从而起到强度均衡作用,有效抑制了激光器谐振腔内的增益竞争^[17],实现多个波长同时激射。图3为不同 α_1 和 α_2 时NPR透射率随 P 变化曲线。

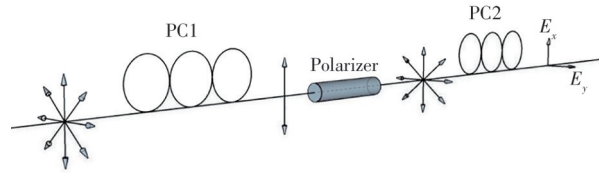


图2 NPR结构示意图

Fig.2 Schematic of NPR structure

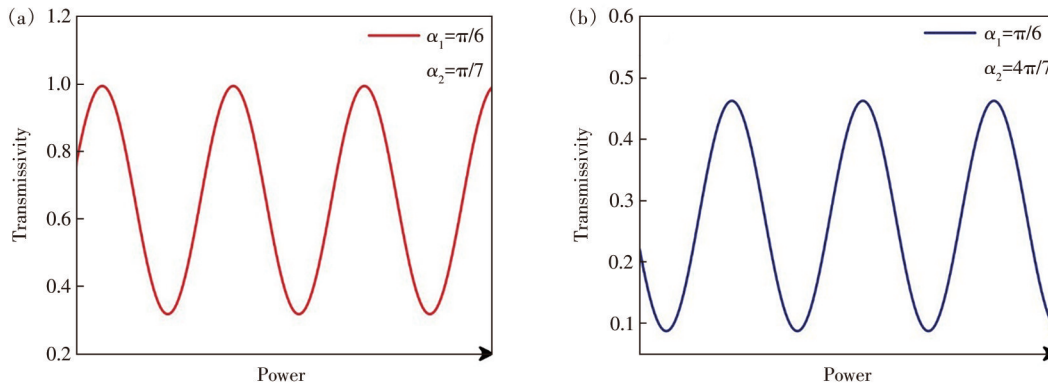


图3 不同 α_1 和 α_2 时NPR透射率随 P 变化曲线

Fig.3 The schematic diagram of NPR transmittance changing with P at different α_1 and α_2

2.4 双向泵浦仿真结果

将NPR组件接入光路,单独使用正向泵浦,将泵浦激光器1的输出设置为4 W时,激光器输出效果不佳,难以调出单波长输出效果;单独使用反向泵浦,也是如此。故选用两个793 nm泵浦激光器对TDF进行泵浦,实测泵浦激光器1的功率

为0.2 W且泵浦激光器2的功率为4 W时,激光器输出状况良好。由于实验中打开两个泵浦光源后,两个(2+1)×1型FC的空余的泵浦输入端口有光泄露出环形腔之外,故使用熔接机对这两个端口进行拼接,做成闭合的子环,接回环形腔内。经仔细分析,这一改进进一步优化了TDF对793 nm

泵浦光的吸收作用。

对稳态条件下 TDF 内的作用建模^[18], 针对单波长情况下的信号光, 分析 TDF 中的放大过程。

双向泵浦时可有方程组如下:

$$\begin{cases} \frac{1}{\tau_{sp30}} N_3(z) + \frac{1}{\tau_{sp20}} N_2(z) + \left(\frac{1}{\tau_{sp10}} + \frac{1}{\tau_{r10}} + W_{10} \right) N_1(z) - (W_{01} + W_{03}) N_0(z) - CR_{3011} - CR_{2011} = 0 \\ \frac{1}{\tau_{sp31}} N_3(z) + \left(\frac{1}{\tau_{sp21}} + \frac{1}{\tau_{r21}} \right) N_2(z) + W_{01} N_0(z) - \left(\frac{1}{\tau_{sp10}} + \frac{1}{\tau_{r10}} + W_{10} \right) N_1(z) + 2CR_{3011} + 2CR_{2011} = 0 \\ \left(\frac{1}{\tau_{sp32}} + \frac{1}{\tau_{r32}} \right) N_3(z) - \left(\sum_{i=0}^1 \frac{1}{\tau_{sp2i}} + \frac{1}{\tau_{r21}} \right) N_2(z) - CR_{2011} = 0 \\ - \left(\sum_{i=0}^2 \frac{1}{\tau_{sp3i}} + \frac{1}{\tau_{r32}} \right) N_3(z) + W_{03} N_0(z) - CR_{3011} = 0 \\ \pm \frac{\partial P_p^\pm(z)}{\partial z} = -\Gamma_p \sigma_a(\lambda_p) N_0(z) P_p^\pm(z) - \alpha_p P_p^\pm(z) \\ \pm \frac{\partial P_s^\pm(z)}{\partial z} = \Gamma_s \left[\sigma_e(\lambda_s) N_1(z) - \sigma_a(\lambda_s) N_0(z) \right] P_s^\pm(z) - \alpha_s P_s^\pm(z) \\ \pm \frac{\partial P_{ASE}^\pm(z, \lambda_i)}{\partial z} = \Gamma_{ASE} \left[\sigma_e(\lambda_i) N_1(z, t) - \sigma_a(\lambda_i) N_0(z, t) \right] P_{ASE}^\pm(z, t) - \alpha_{ASE} P_{ASE}^\pm(z, t) + 2\sigma_e(\lambda_i) N_1(z, t) \frac{hc^2}{\lambda_i^3} \Delta\lambda \end{cases} \quad (4)$$

边界条件如下:

$$\begin{cases} P_p^+(0) = P_{p_in}^+ & P_p^-(L) = P_{p_in}^- \\ P_s^+(0) = P_{s_in}^+ & P_s^-(L) = P_{s_in}^- \\ P_{ASE}^+(0, \lambda_i) = 0 & P_{ASE}^-(L, \lambda_i) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中规定正负号代表正反向, 正向为向右传输。其中 $P_p^\pm(z)$, $P_s^\pm(z)$ 代表 z 处的泵浦光功率和信号光功率。 Γ_p 代表泵浦光与增益光纤中掺杂离子分布区域的重叠因子, CR_{3011} 和 CR_{2011} 是交叉弛豫过程。输出特性仿真参数如表 2 所示。

忽略 FC 各端口的熔接损耗和 FC 本身的插入损耗后, 针对端面抽运, 运用速率方程组和边界条件对光纤激光器的 TDF 内功率分布情况进行数值仿真, 主要参数设置(表 3)如下: P_{pl} 为前向注入的泵浦光功率, P_{pr} 为后向注入的泵浦光功率, P_s 为从 FC 的信号输入端正向进入的光功率, 弛豫时间分别为 $340e-6$ 和 $14.2e-6$, P_{pl} 和 P_{pr} 的中心波长都为 793 nm , P_s 光波长在程序中设定为 1940 nm , 前向泵浦、后向泵浦、双向泵浦的仿真结果如图 4 和

表 2 输出特性仿真参数表

Tab. 2 Main simulation parameters for the output characteristics

物理量	符号	参考值
泵浦光波长	λ_p	793 nm
泵浦光重叠因子	Γ_p	0.896
纤芯直径	R_{core}	10 μm
泵浦光吸收截面	$\sigma_a(\lambda_p)$	$8.5 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
泵浦光发射截面	$\sigma_e(\lambda_p)$	$8.9 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
普朗克常数	h	$6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
N_3 能级寿命	τ_{10}	340 μs
N_3 交叉弛豫速率	k_{3101}	$3 \times 10^{-23} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
N_3 上转换速率	k_{1310}	$2.4 \times 10^{-23} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
泵浦功率	P_p	/
信号光波长	λ_s	2000 nm
信号光重叠因子	Γ_s	0.752
包层直径	$R_{cladding}$	130 μm
信号光吸收截面	$\sigma_a(\lambda_s)$	$1 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
信号光发射截面	$\sigma_e(\lambda_s)$	$2.5 \times 10^{-25} \text{ m}^2$
真空光速	c	$3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
N_2 能级寿命	τ_{31}	14.2 μs
N_2 交叉弛豫速率	k_{2101}	$3 \times 10^{-25} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
N_2 上转换速率	k_{1210}	$1.5 \times 10^{-25} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
掺杂浓度	N	$5 \times 10^{26} \text{ m}^{-3}$

表 3 泵浦参数表

Tab. 3 Parameters of pump

Pump forms	Length/m	P_{pl}/W	P_{pr}/W	P_s/W
Forward pump	1.8	4	0	0.5
Backward pump	1.8	0	4	0.5
Bidirectional pump 1	1.8	4	0.2	0.5
Bidirectional pump 2	1.8	4	4	0.5
Bidirectional pump 3	1.8	0.2	0.2	0.5
Bidirectional pump 4	1.8	0.2	4	0.5

图 5 所示。

经实验验证, 双向泵浦 4 的效果最好, 分析原因可能是单独正向泵浦由于 TDF 为 1.8 m , 其内存在一定的重吸收效果, 影响了信号光的放大。若不打开泵浦激光器 1, 则泵浦激光器功率为 4 W 时都不出现单波长峰, 故 0.2 W 的正向泵浦输入是必要的。

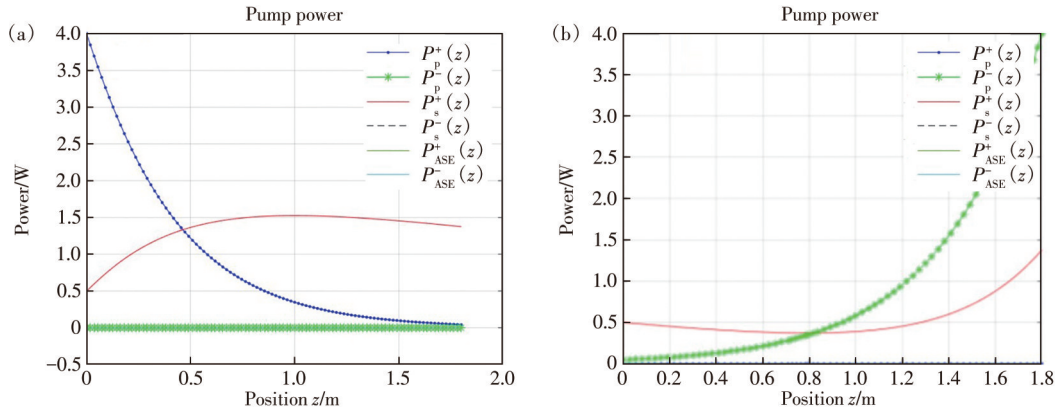


图 4 (a)前向泵浦腔内光功率分布图;(b)反向泵浦腔内光功率分布图

Fig.4 (a)Optical power distribution in the cavity when pump form is forward pump. (b)Optical power distribution in the cavity when pump form is backward pump

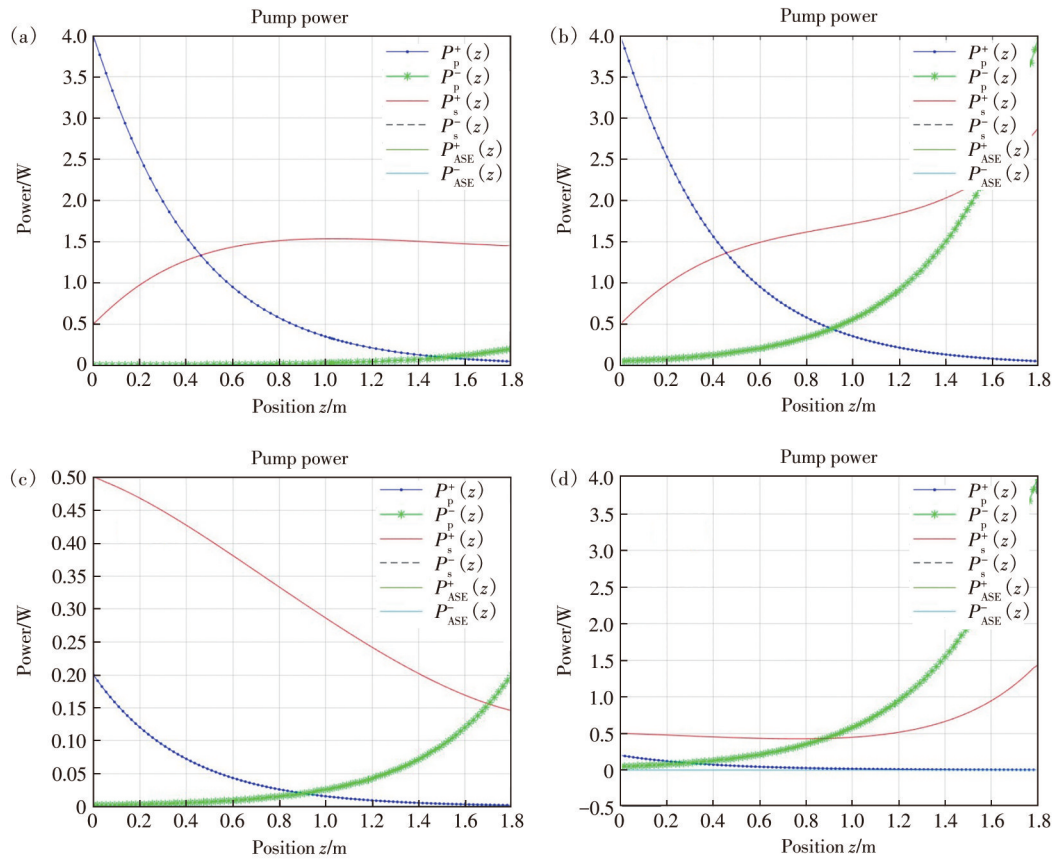


图 5 (a)双向泵浦 1腔内光功率分布图;(b)双向泵浦 2腔内光功率分布图;(c)双向泵浦 3腔内光功率分布图;(d)双向泵浦 4腔内光功率分布图

Fig.5 (a)Optical power distribution in the cavity when pump form is bidirectional pump 1. (b)Optical power distribution in the cavity when pump form is bidirectional pumping 2. (c)Optical power distribution in the cavity when pump form is bidirectional pumping 3. (d)Optical power distribution in the cavity when pump form is bidirectional pumping 4

3 结果与讨论

本文设计搭建的 TDFL 谐振腔结构放置在超稳光学平台上,两台泵浦源放置在另外的光学平台,防止不可避免的泵浦源激光器工作振动干扰

谐振腔及其内的光纤器件,影响 TDFL 输出稳定性。在实验过程中,设置两个 793 nm 泵浦源的输出功率分别为 0.2 W 和 4 W,适当调节谐振腔内的 PC 1 和 PC 2,在光谱仪上可观察到明显的单波长和双波长激射。图 6 所示为激光器分别在

1 940.47 nm 和 1 942.87 nm 处单波长输出光谱, 输出激光的中心波长分别对应两个 SI-FBG 各

自一个反射通道, 图 7 所示为两个波长同时输出的光谱。

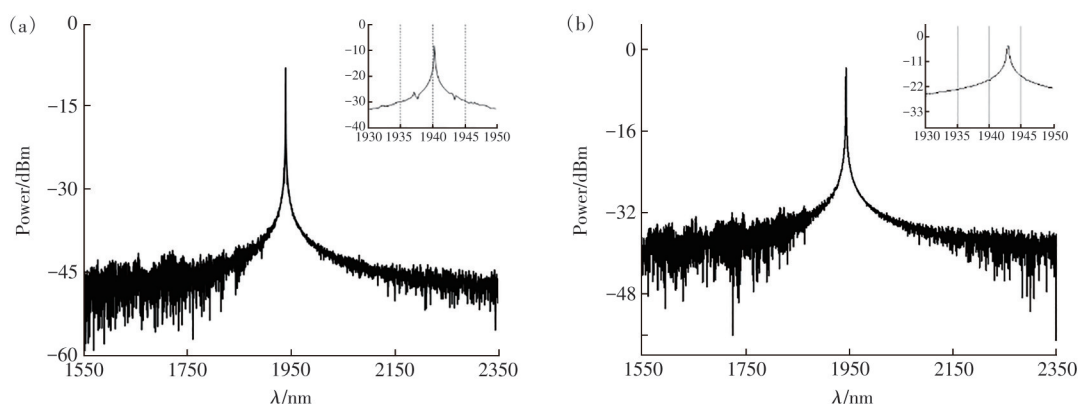


图 6 激光器单波长输出光谱: (a)1 940.47 nm, (b)1 942.87 nm

Fig.6 Spectrum of the single wavelength when outputting at 1 940.47 nm(a) and 1 942.87 nm(b)

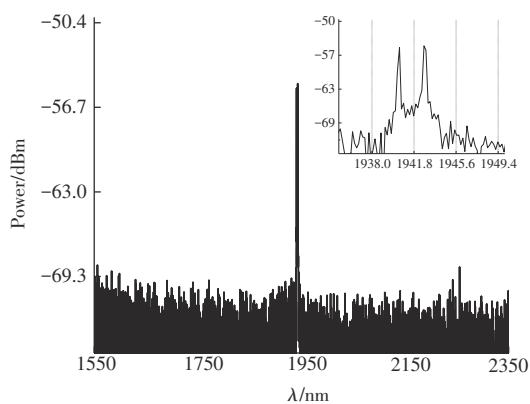


图 7 激光器在 1 940.47 nm 和 1 942.87 nm 处双波长输出光谱

Fig.7 Spectrum of the dual wavelength when outputting at 1 940.47 nm and 1 942.87 nm

在实验室恒温恒湿条件下, TDFL 连续工作 50 min, 为进一步分析 TDFL 双波长输出的稳定性, 使用光谱仪和 Laserpoint 公司生产的 2 μm 波段光功率计定量分析了 50 min 内激光的波长漂移

和功率波动, 如图 8 和图 9 所示。

图 8(a) 是监测 50 min 下单波长 1 940.47 nm 输出情况, 测试期间的波长漂移小于 0.01 nm, 功率波动小于 2.125 dB。其中, 第 5 min 和 10 min 的功率测量值较小, 这种现象是泵浦激光器开机工作后短时间内不稳定输出造成的。可以看出, 在 10 min 后, 1 940.47 nm 波长波动在 OSA 的分辨率之内, 峰值功率抖动在 0.59 dB 以下, 表现出较好的功率稳定性。图 8 (b) 是在单波长输出情况下, 在 5 min 后, 1 942.87 nm 波长波动在 OSA 的分辨率之内, 峰值功率抖动在 0.67 dB 以下。由于所用光谱仪的最小分辨率为 0.1 nm, 可以认为该 TDFL 在 1 940.47 nm 处单波长输出时有较好的波长稳定性, 50 min 内的波长漂移小于 0.1 nm。图 9 所示为双波长输出情况下, 1 940.47 nm 处输出激光未观测到明显的波长漂移, 峰值功率抖动在 0.43 dB 以下, 1 942.47 nm 处输出激光也未观

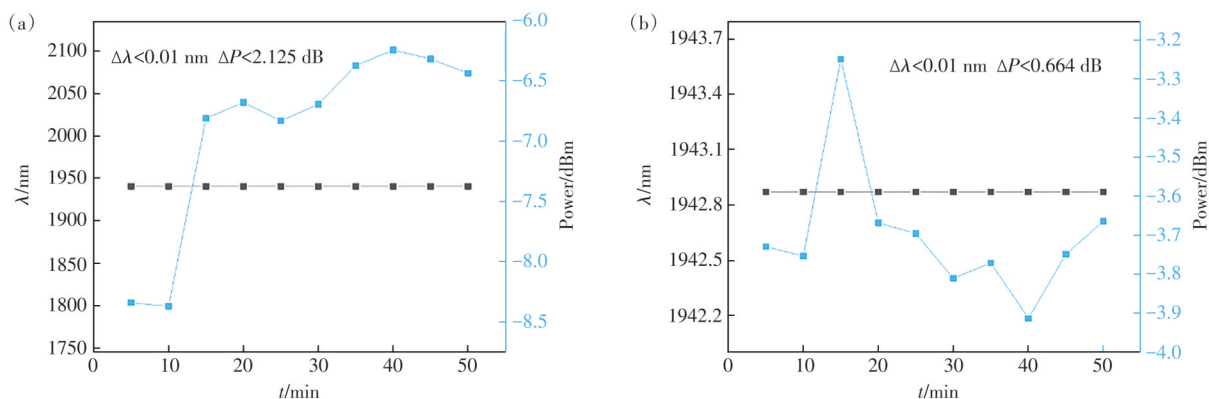


图 8 50 min 内单波长输出时波长漂移和功率波动图: (a)1 940.47 nm, (b)1 942.87 nm

Fig.8 The wavelength drift and power fluctuations at single wavelength output within 50 min: (a)1 940.47 nm, (b)1 942.87 nm

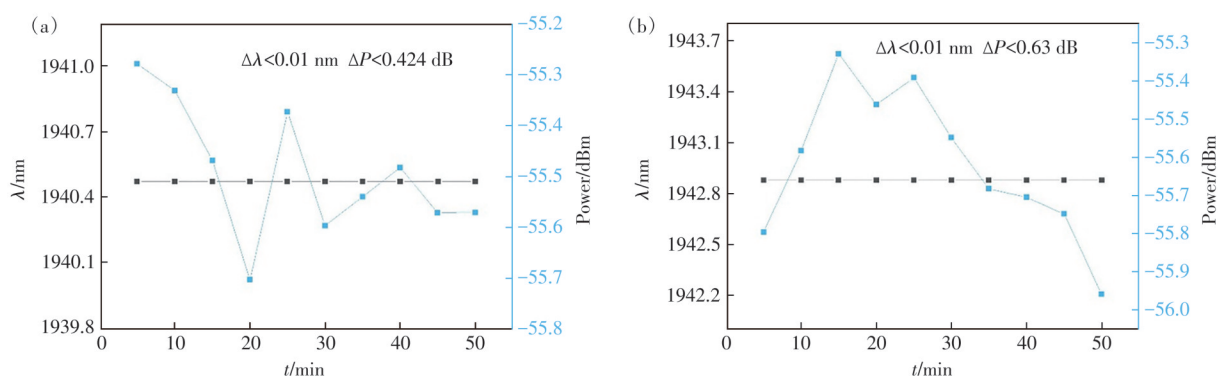


图9 50 min内双波长1 940.47 nm和1 942.87 nm输出时波长漂移和功率波动图:(a)1 940.47 nm,(b)1 942.87 nm

Fig.9 The wavelength drift and power fluctuations at dual wavelength 1 940.47 nm and 1 942.87 nm output within 50 min:
(a)1 940.47 nm, (b)1 942.87 nm

测到明显的波长漂移,峰值功率抖动在0.63 dB以下,两个波长的光信噪比均大于15.3 dB。实验数据表明,在稳定性测试的50 min内,基于NPR效应的双波长TDFL可以稳定运转,两个波长的功率波动主要受限于泵浦激光器的输出稳定性。

4 结 论

本文提出一种基于SI-FBG和NPR效应的双波长可切换掺铥光纤激光器,使用的TDF长度为1.8 m,在0.2 W和4 W的输入功率下。谐振腔内的NPR结构实现了强度均衡作用,抑制了各波长间的增益竞争,使得输出激光中心波长可在

1 940.47 nm和1 942.87 nm间灵活切换,激光器也可运转在稳定的双波长激射状态。在50 min测试时间内,任意单波长输出和双波长输出的波长漂移与功率波动均小于0.1 nm和0.66 dB。基于该TDFL可进一步设计2 μm波段高稳定性超窄线宽光纤光源系统,经过一定的光放大处理,是光纤通信系统及分布式光纤传感系统的理想光源,在通信、工业、医疗等领域具有重要的应用价值。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240174>.

参 考 文 献:

- [1] 王郡婕. 2 μm高功率掺铥光纤激光器研究进展[J]. 激光杂志, 2015, 36(8): 5-7.
WANG J J. The research progress of 2 μm high-power thulium doped fiber laser [J]. *Laser J.*, 2015, 36(8): 5-7. (in Chinese)
- [2] 焦明星, 邢俊红, 同聪维, 等. 双波长单纵模掺铥光纤环形激光器设计及实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602013.
JIAO M X, XING J H, TONG C W, *et al.* Design and experimental study of two-wavelength single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2013, 40(6): 0602013. (in Chinese)
- [3] 吴玲, 娄岩, 侯欣宜, 等. 2-μm MOPA结构全光纤激光器输出特性研究[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(2): 399-406.
WU L, LOU Y, HOU X Y, *et al.* Output characteristics of an all-fiber laser with a 2-μm MOPA structure [J]. *Chin. Opt.*, 2023, 16(2): 399-406. (in Chinese)
- [4] 戴川生, 董志鹏, 林加强, 等. 基于纯水可饱和吸收体的1.9 μm波段被动调Q和锁模掺铥光纤激光器[J]. 物理学报, 2022, 71(17): 174202.
DAI C S, DONG Z P, LIN J Q, *et al.* Passively Q-switched and mode-locked 1.9 μm Tm-doped fiber laser based on pure water as saturable absorber [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2022, 71(17): 174202. (in Chinese)
- [5] 何巍, 王大博, 董明利, 等. 基于Sagnac环形滤波器的多波长掺铥光纤激光器[J]. 纳米技术与精密工程, 2016, 14(3): 206-210.

- HE W, WANG D B, DONG M L, *et al.* Multi-wavelength Tm-doped fiber laser based on Sagnac loop filter [J]. *Nano-technol. Precis. Eng.*, 2016, 14(3): 206-210. (in Chinese)
- [6] 关彪, 延凤平, 冯亭, 等. 基于无源双环复合子腔滤波器的可调谐单纵模掺铥光纤激光器 [J]. *发光学报*, 2023, 44(8): 1479-1486.
- GUAN B, YAN F P, FENG T, *et al.* A tunable single-longitudinal-mode thulium-doped fiber laser enabled by a passive double-ring compound sub-cavity filter [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(8): 1479-1486. (in Chinese)
- [7] PATYK R L, GRABARSKI L, KALINOWSKI H J. Fiber Bragg grating thermometry application to measure flow: laminar and turbulent regimes [J]. *Appl. Opt.*, 2023, 62(16): E92-E95.
- [8] ZAKI M, ABOURICHA M, AMRANE S. The comparative study of high efficiency of Tm³⁺ doped fiber laser at 1.72 μm for different pump schemes [J/OL]. 2024-07-20. <https://arxiv.org/abs/2405.07269>.
- [9] MILUSKI P, MICHALSKA M, KOCHANOWICZ M, *et al.* Tm³⁺ doped multi-ring profile single-mode fiber laser for application in the eye-safe spectral range [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2024, 42(10): 3844-3851.
- [10] GENG J H, WANG Q, LEE Y, *et al.* Development of eye-safe fiber lasers near 2 μm [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2014, 20(5): 150-160.
- [11] YANG W, LU P, JIANG S B, *et al.* A tunable and switchable dual-wavelength single-longitudinal-mode fiber laser at 2 μm based on saturable absorber and self-injection locking [C]. *Proceedings of the 2016 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, CA, USA, 2016: 1-2.*
- [12] QI S X, HOU Y B, ZHANG Q, *et al.* High-power, narrow linewidth single-frequency fiber laser at 2 μm [C]. *Proceedings of SPIE 10619, International Conference on Optical Instruments and Technology: Advanced Laser Technology and Applications, Beijing, China, 2018: 1061907.*
- [13] AHMAD H, SAMION M Z, THAMBIRATNAM K, *et al.* Widely tunable dual-wavelength thulium-doped fiber laser operating in 1.8–2.0 μm region [J]. *Optik*, 2019, 179: 76-81.
- [14] ZHANG L N, YAN F P, FENG T, *et al.* Six-wavelength-switchable narrow-linewidth thulium-doped fiber laser with polarization-maintaining sampled fiber Bragg grating [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2021, 136: 106788.
- [15] MAMUTI R, FUJI T, KUDO T. Direct trapping of micro particles with a 2 μm Tm-doped fiber laser [C]. *Proceedings of the 2022 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, Sapporo, Japan, 2022: 1-2.*
- [16] 陶蒙蒙, 王亚民, 吴昊龙, 等. 基于宽带可调谐、窄线宽掺铥光纤激光器的 2 μm 波段水的超光谱吸收测量 [J]. *物理学报*, 2022, 11(71): 114203.
- TAO M M, WANG Y M, WU H L, *et al.* Hyperspectral absorption of water around 2 μm based on a broadband tunable, narrow linewidth Tm-doped fiber laser [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2022, 71(11): 114203. (in Chinese)
- [17] LIU P, WANG T S, ZHANG P, *et al.* Widely tunable multi-wavelength thulium-doped fiber laser based on nonlinear polarization rotation [J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2016, 58(7): 1540-1543.
- [18] FANG Q, SHI W, KIEU K, *et al.* High power and high energy monolithic single frequency 2 μm nanosecond pulsed fiber laser by using large core Tm-doped germanate fibers: experiment and modeling [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(15): 16410-16420.



王鹏飞(1994–),男,山西兴县人,博士研究生,2017年于中北大学获得学士学位,主要从事光纤激光器方面的研究。

E-mail: 19111040@bjtu.edu.cn



延凤平(1966–),男,山西兴县人,博士,教授,1996年于北方交通大学获得博士学位,主要从事光纤激光器、光纤传感器、光纤通信、太赫兹超材料等方面的研究。

E-mail: fpyan@bjtu.edu.cn