

引用:李嘉鑫,张丽强,姚一村,等. 基于飞秒激光直写长周期光纤光栅的可调谐锁模激光器[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2025,38(6):864-873.

Citation:LI Jiaxin, ZHANG Liqiang, YAO Yicun, SUO Yuman, WANG Minghong. Tunable mode-locked laser based on femtosecond laser direct writing of long-period fiber gratings[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025,38(6):864-873.

文章编号 1672-6634(2025)06-0864-10

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025030021

基于飞秒激光直写长周期光纤光栅的 可调谐锁模激光器

李嘉鑫,张丽强,姚一村,索玉曼,王明红

(聊城大学 物理科学与信息工程学院,山东 聊城 252059)

摘要 报道了一种基于飞秒激光直写长周期光纤光栅(LPFG)的波长可调谐锁模激光器。使用飞秒激光器,直写了周期为 50 μm 的 LPFG,其在 1 032.67 nm 附近透射峰的 3 dB 带宽为 12.09 nm。将 LPFG 作为滤波器用于掺镱光纤锁模激光器,获得了稳定的锁模脉冲。改变周围介质的折射率,LPFG 的透射波长随之改变。当介质折射率在 1.40~1.43 范围变化时,锁模激光器的工作波长在 1 046.42~1 060.25 nm 范围内可调谐,总调谐范围 13.83 nm。与其他波长调谐方式相比,飞秒激光直写的光纤光栅结构简单,参数灵活,易于与光纤器件集成。

关键词 锁模光纤激光器;飞秒激光;长周期光纤光栅(LPFG);滤波;波长可调谐

中图分类号 TN248

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Tunable mode-locked laser based on femtosecond laser direct writing of long-period fiber gratings

LI Jiaxin, ZHANG Liqiang, YAO Yicun, SUO Yuman, WANG Minghong

(School of Physics Science and Information Technology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract A wavelength-tunable mode-locked laser based on femtosecond laser direct writing of long-period fiber gratings (LPFGs) is reported in this paper. Using a femtosecond laser, an LPFG with a period of 50 μm was inscribed, which exhibits a 3 dB bandwidth of 12.09 nm for its transmission peak near 1 032.67 nm. The LPFG was utilized as a filter in a ytterbium-doped fiber mode-locked laser, resulting in stable mode-locked pulses. By altering the refractive index of the surrounding medium, the transmission wavelength of the LPFG shifts accordingly. When the refractive index of the medium varies within the range of 1.40 to 1.43, the operating wavelength of the mode-locked laser is tunable from 1 046.42 nm to 1 060.25 nm, with a total tuning range of 13.83 nm. Compared to other wavelength tuning methods, the fiber grating inscribed by femtosecond laser direct writing features a simple structure, flexible parameters, and ease of integration with fiber devices.

Keywords mode-locked fiber laser; femtosecond laser; long-period fiber grating (LPFG); filtering;

收稿日期:2025-03-25

基金项目:国家自然科学基金项目(11375081);山东省自然科学基金项目(ZR2022MF258);聊城大学科研基金项目(318052199)资助

通信作者:张丽强,女,汉族,博士,副教授,研究方向:先进激光技术、传感技术及应用,E-mail:zhangliqiang@lcu.edu.cn。

wavelength-tunable

0 引言

锁模光纤激光器输出的脉冲激光具有脉冲宽度窄、峰值功率高以及光束质量好等特点,在高精度工业加工、生物医药、航空航天、军事以及科研探索等领域得到了广泛的应用^[1]。锁模技术主要分成主动锁模和被动锁模两大类。主动锁模通过外部的信号源调控激光腔内元件,典型器件如声光调制器,可周期性地改变激光腔内的相位条件和损耗来实现锁模。被动锁模则利用激光腔内的可饱和吸收体来获得激光脉冲。可饱和吸收体是一种非线性器件,其透过率随光强度的增大而升高,从而允许高峰值功率的脉冲通过而抑制背景光,最终形成稳定的锁模脉冲序列。目前,通过使用掺杂不同元素的光纤,可实现不同波长的锁模激光输出。掺铒光纤激光器工作在光纤通信 C/L 波段^[2],广泛应用于高分辨率光谱分析和光学传感领域。基于铥离子独特的能级结构,掺铥光纤激光器的工作波长集中在 1.9~2.1 μm ^[3],适用于生物医药、科研以及军事等领域。掺镱光纤激光器工作在近红外 1.0 μm 波段^[4],在光纤通信、工业加工以及超快光学领域有广泛应用。

和单波长锁模光纤激光器相比,波长可调谐或可切换的激光器可以根据需求选择激光器的工作波长,在光谱学、光通信、生物医学、环境检测^[5-6,7]等多个领域展现出广泛的应用价值。为了控制激光腔内的增益竞争,实现激光波长的可调谐或可切换,通常需要在激光系统中集成波长选择器件。光纤激光器中常用的波长选择器件有衍射光栅^[8]、双折射滤光片^[9]以及基于各种干涉效应制备的多模干涉滤波器^[10]等。衍射光栅和双折射滤光片为分离元件,增加了系统的复杂性。多模干涉滤波器通常将单模光纤中传输的光分到不同的光路或分成不同的模式,这些光经过不同光程后再汇合,因其之间存在光程差而产生干涉现象。这种滤波器结构紧凑,易于与光纤集成,但制备过程通常用到特殊的光纤,或用到拉锥等特殊的光纤处理过程,增加了激光器的成本。

长周期光纤光栅(LPFG)是在光纤纤芯内形成的周期性折射率调制结构^[11],与传统的布拉格光纤光栅(FBG)相比,LPFG 周期相对较长,通常在几百微米到毫米量级。LPFG 结构紧凑,插入损耗小,并且易于集成到现有光纤系统中^[12],在光纤传感以及光纤通信^[13]领域应用广泛。LPFG 利用纤芯基模和包层模之间的同向耦合,当满足相位匹配条件时,特定波长的光从纤芯耦合到包层并损耗掉,从而在透射谱上形成损耗峰。利用这一特性,将 LPFG 置于激光器的谐振腔内,只有满足透射条件的特定波长的光才能在腔内有效振荡并输出,其他波长的光被抑制,从而实现波长选择的功能。2014 年,朱晓军等人使用 CO_2 激光器直写 LPFG,通过改变光栅的弯曲曲率,实现了激光器从 1 028.2~1 039.6 nm 的连续可调^[14]。2017 年,王杰等人设计了 LPFG 集成微流体芯片的可调谐锁模光纤激光器,其调谐范围从 1 564~1 568.6 nm^[15]。2023 年,蒋俊杰等人将 LPFG 应用在 L 波段锁模光纤激光器中,通过弯曲 LPFG 调谐激光器的工作波长,调谐范围为 23.98 nm^[16]。

LPFG 的制备方法有很多,常用的有紫外准分子激光器直写法以及 CO_2 激光器直写法。紫外准分子激光器制备 LPFG 需要对光纤进行增敏处理,并且用到价格昂贵的相位掩模板^[17]。 CO_2 激光器制备光纤光栅不需要对光纤进行特殊处理,但制备的 LPFG 插入损耗大^[18]。飞秒激光的脉冲宽度只有几个到几百个飞秒,可以在短时间内产生超高的脉冲能量。相比于传统方法,飞秒激光直写光纤光栅不需要复杂的相位掩模板和特殊的光纤预处理过程,简化了操作流程,并提供了灵活的参数设置选项,可以制备出低偏振相关、低插损和高耦合强度的光纤光栅^[19]。

本文使用飞秒激光直写 LPFG,并将其作为滤波器集成到掺镱激光器系统中实现锁模脉冲输出。改变 LPFG 介质折射率,LPFG 传输的光谱特性发生变化,滤除波段范围发生漂移,从而改变激光器的工作波长。搭建的锁模激光器从 1 046.42~1 060.25 nm 波长可调,总调谐范围为 13.83 nm。另外,还对激光器在脉冲稳定性方面的性能进行了测试。

1 长周期光纤光栅的原理

光在 LPFG 中传输时,存在多种传输模式,包括基模和各种高阶模,不同模式具有不同的传播常数。当

基模和某些高阶模的传播常数满足一定的相位匹配条件时,光能量从基模耦合到高阶模^[20]。被耦合到高阶模的光在光纤包层中传输时,由于包层与周围环境的相互作用,导致光能量的损耗。当入射光中包含多个波长成分时,只有特定波长的光会被耦合到高阶模,其他波长的光继续以基模形式在光纤中传输。

LPFG 相位匹配条件可以表示为^[21]

$$\lambda_L = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})\Lambda_L, \quad (1)$$

式中 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 分别为纤芯模和包层模的传播常数, Λ 是光栅周期。通过调整光栅周期 Λ 可以精确控制谐振波长的位置,来实现对不同波长光的选择性滤波功能。当外部介质折射率发生变化时,光纤包层与外界交界面上的光学条件发生改变,从而使得有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 改变,其谐振波长也随之改变。另外,LPFG 在中心波长 λ_L 处的透射率 T 也与外部介质环境有关^[22]

$$T = \sin^2(\kappa L), \quad (2)$$

式中 $\kappa = \frac{\pi \Delta n_{\text{co}} I}{\lambda}$ 表示纤芯模与包层模之间的耦合系数, Δn_{co} 表示纤芯的调制率, L 为光栅长度。 I 为纤芯区域内基模与包层模的交叉积分

$$I = \frac{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^a E_{\text{core}} E_{\text{clad}}^* r dr}{\sqrt{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^a E_{\text{core}} E_{\text{clad}}^* r dr} \cdot \sqrt{\int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\infty E_{\text{core}} E_{\text{clad}}^* r dr}}, \quad (3)$$

式中 E_{core} 和 E_{clad} 分别表示为纤芯模和包层模的电场幅值, a 为纤芯半径。由此可以看出,当介质折射率发生变化时,会导致包层的有效折射率 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 发生变化, $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 的变化会导致交叉积分 I 和耦合系数 κ 发生改变,最终使谐振波长对应的透射率发生变化,引起谐振峰强度的变化。

LPFG 的谐振波长对周围介质的折射率变化非常敏感,折射率的变化会导致谐振波长发生移动,实现波长调谐。为了进一步理解这一现象,可以通过分析弱导光纤中的模式特性来解释。在弱导光纤中,纤芯基模 LP01 的特征方程由下式给出^[23]:

$$V\sqrt{1-b} \frac{J_1(1-b)}{J_0(1-b)} = V\sqrt{b} \frac{K_1(V\sqrt{b})}{K_0(V\sqrt{b})}, \quad (4)$$

式中归一化频率 $V = k_0 a_1 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$, $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ 为波数。 a_1 为纤芯半径, n_1 和 n_2 分别为纤芯和包层的折射率。

J_0 和 J_1 是 0 阶第一类贝塞尔函数, K_0 和 K_1 为 0 阶和 1 阶修正第二类贝塞尔函数。由(4)式可以看出,纤芯导模有效折射率与 V 和 b 有关,具体取决于光纤的纤芯半径以及纤芯和包层的折射率。

此外,在弱导光纤中,包层模式近似为 LP₀ m 模($m > 1$)。在包层半径 a_2 远大于纤芯半径 a_1 的情况下,由包层模的色散方程得到包层模有效折射率为^[23]

$$n_{\text{eff}}^{\text{cl}} = n_2 - \frac{U_\infty^2}{2n_2 a_2^2 k^2} \left(1 - \frac{2}{ka_2 \sqrt{n_2^2 - n_3^2}} \right) + \frac{n_2}{2n_1^2} \times (n_1^2 - n_2^2) \left(\frac{a_1}{a_2} \right)^2 \frac{J_0^2 \left(U_\infty \frac{a_1}{a_2} \right) + J_1^2 \left(U_\infty \frac{a_1}{a_2} \right)}{J_0^2(U_\infty) + J_1^2(U_\infty)}, \quad (5)$$

式中 a_2 为包层半径, n_3 为外界环境折射率, U_∞ 为 0 阶第一类贝塞尔函数 J_0 的 m 阶根。由(5)式可知,包层模式的有效折射率与包层半径以及纤芯、包层、外界环境折射均密切相关。

在光栅不变的情况下,即纤芯和包层的半径及折射率均不变,则相位匹配方程中仅剩外界环境折射率 n_3 作为唯一变量,当外界折射率由 n_3 变为 n_3' 时,谐振波长漂移量可表示为^[23]

$$\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0 = \frac{U_\infty^2}{n_2 a_2^2 k^3} \left(\frac{1}{\sqrt{n_2^2 - n_3^2}} - \frac{1}{\sqrt{n_2^2 - n_3'^2}} \right). \quad (6)$$

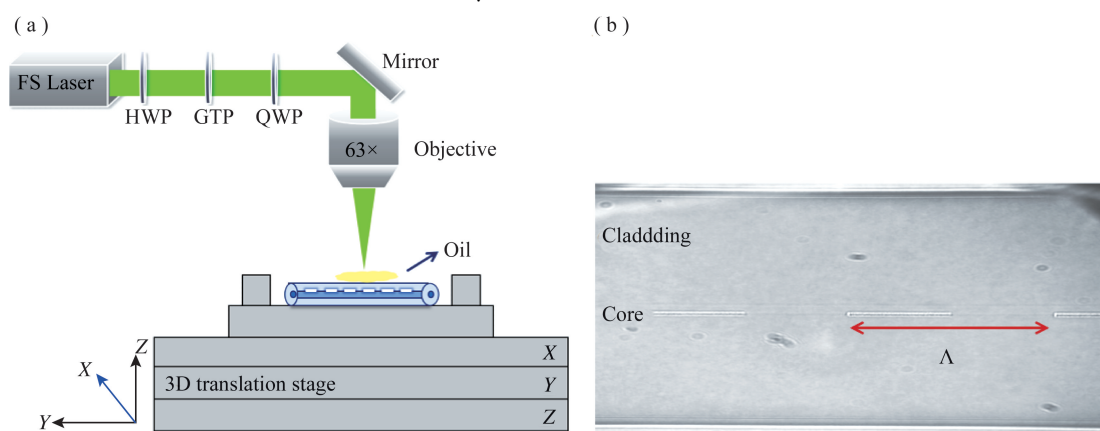
由公式(6)可知,通过改变外界介质的折射率,可以实现对 LPFG 谐振波长的高效、精准调控,实现波长调谐。

2 LPFG 的制备

图 1(a)展示了飞秒激光直写 LPFG 的示意图。使用的飞秒激光器是固态激光系统(Newport Corp,

Spirit One 1040-8-SHG),激光器中心波长为 520 nm,脉冲宽度 400 fs。使用半波片(HWP)与 Glan-Taylor 棱镜(GTP)精确控制飞秒激光脉冲的能量。直写的光纤为康宁 HI1060 单模光纤(SMF),纤芯直径为 5.3 μm ,纤芯折射率与包层折射率分别为 1.464 和 1.444 7。将 SMF 剥去涂覆层放置在载玻片上并固定在三维位移平台上,精确控制三维位移平台确保飞秒激光与 SMF 精确对准。为了消除像差,在 SMF 上滴加折射率匹配油。使用的物镜为 63 倍油镜。

直写过程中,飞秒激光器的直写速度设置为 100 $\mu\text{m}/\text{s}$,重复频率为 200 kHz,单脉冲能量约 49 nJ。根据(1)式可以计算出 LPFG 谐振波长在 1 040 nm 附近。较小的光栅周期 Λ 会引发多阶包层模的复杂耦合行为,使光谱中出现多谐振峰^[24]。为了实现所需的光谱特性,必须对光栅参数进行精确控制,直写制备的 LPFG 光栅周期为 50 μm 。光栅长度 L 与模式耦合效率呈正相关,较长的光栅长度 L 可以显著增强纤芯模与包层模之间的能量交换,提升谐振峰的深度和灵敏度^[25],但也更容易受到外界环境因素的影响,限制其可调谐范围。制备的 LPFG 包含 120 个周期,总长度为 6 000 μm 。这种设计保证了足够的模式耦合效率产生显著的谐振峰,并减少了因外界环境变化带来的影响,确保了器件的稳定性和可靠性。直写区域偏于 SMF 纤芯 2.76 μm ,处于包层和纤芯的交界处。这种直写区域可以提高 LPFG 中的模式耦合效率,并优化基模与包层模之间的相互作用^[26]。所制备的 LPFG 的占空比为 50%,即在一个完整的光栅周期内,高折射率区和低折射率区各自占据了一半的空间,从而消除二次、三次谐波,弱化四次谐波^[27],优化 LPFG 透射谱性能,降低传输损耗。图 1(b)给出了使用 40 倍 CCD 观察到的 LPFG,LPFG 的宽度为 2.44 μm 。图中展示大约 3 个周期的 LPFG,一个周期内的直写长度为 25 μm 。



注:(a) 飞秒激光直写 LPFG 的示意图;(b) 使用 40 倍 CCD 观察到的 LPFG。

图 1 LPFG 制备的示意图

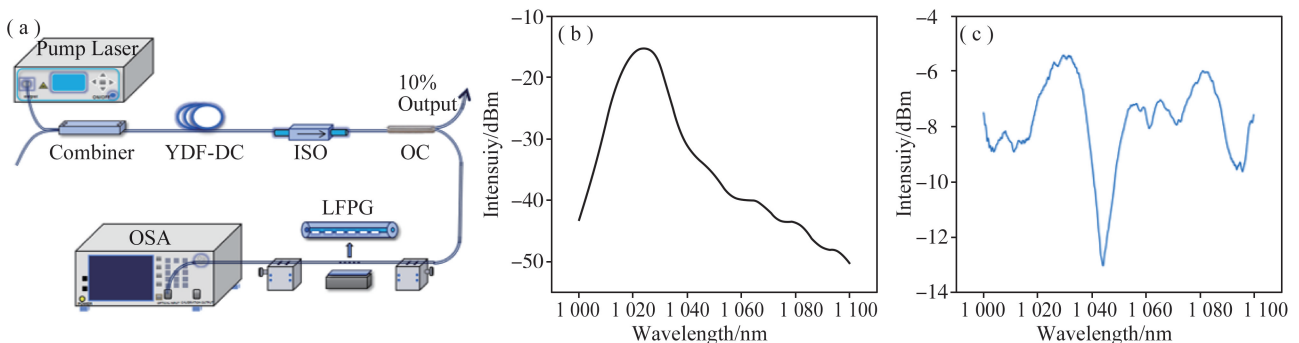
Fig. 1 Illustration of the LPFG fabrication process

3 LPFG 的调谐特性

将 LPFG 固定在三维调节支架上保持不动,下方放置升降台。使用自制的自发辐射源测量光栅的透射谱特性,实验装置如图 2(a)所示。自发辐射源由泵浦源(Pump Laser)、合束器(Combiner)、掺镱光纤(YDF-DC)、分光比为 10/90 的光纤耦合器(OC)以及隔离器(ISO)组成。其中,合束器用于将泵浦激光器发出的光耦合到掺镱光纤,隔离器用于保证光的单向传输。使用光谱分析仪(OSA, Yokogawa, AQ 6374)测量和分析 LPFG 的透射曲线,光谱仪的分辨率设置为 0.05 nm。自制 ASE 光源的光谱如图 2(b)所示,从图 2(b)可以看出,1 030 nm 附近增益较强。图 2(c)给出了光谱仪测量到的 LPFG 的透射曲线。透射曲线在 1 044.37 nm 处有一明显的凹陷,与计算得到的谐振波长基本一致。凹陷右侧和左侧有两个明显的透射峰,右侧透射峰中心波长为 1 032.67 nm,3 dB 带宽对应 12.09 nm,损耗为 -5.43 dB。左侧透射峰中心波为 1 081.29 nm,2 dB 带宽对应 16.71 nm,损耗为 -5.97 dB。

改变 LPFG 周围介质的折射率,谐振波长发生改变,左侧透射峰的中心波长随之改变。使用甘油和纯水配置不同折射率的溶液,并通过 NAR-3T 台式阿贝折射仪进行检测。实验过程中,调节升降台使 LPFG

浸没在溶液中,并保证只有折射率溶液与 LPFG 接触。由于光纤材料的热光效应^[28],谐振波长会随温度变化发生漂移。LPFG 的纤芯基模、包层模有效折射率及光栅周期都是轴向应变的函数^[29],对 LPFG 施加额外应变,也会引起谐振峰强度的变化。为了避免这些因素对实验结果的影响,在测量 LPFG 的调谐特性时,均保持 LPFG 悬空拉直状态,并严格控制在室温条件下进行,从而最小化温度和机械应变对实验结果的干扰。图 3 给出了使用不同折射率溶液时测量得到的 LPFG 的调谐特性。可调谐极限不仅与光栅周期、光栅长度以及折射率调制深度等参数有关,还需考虑外部介质折射率的直接影响。当介质折射率接近或超过包层模式的有效折射率时,无法满足相位匹配条件,包层模式将无法被有效限制在光纤内部,导致模式耦合效率降低,甚至使谐振峰消失^[23]。当 LPFG 介质折射率为 1.40 时,LPFG 的谐振波长为 1 062.11 nm,左侧透射峰的中心波长为 1 046.42 nm,3 dB 带宽为 26.67 nm,插入损耗为 -4.31 dB。当溶液折射率升高时,LPFG 的谐振波长向长波方向漂移(红移),并且谐振峰强度也呈现出逐渐减小的趋势。当折射率增加至 1.43 时,谐振波长移动至 1 077.93 nm 处,而谐振峰强度降低至 -9.68 dB。在这个过程中,左侧透射峰的中心波长从 1 046.42 nm 移动至 1 060.25 nm,移动范围为 13.83 nm,3 dB 带宽在 26.67~27.21 nm 范围变化。当折射率超过 1.44 时,实验中观察到 LPFG 谐振峰消失。文献[15]报道了使用 CO₂ 激光器制备的光纤光栅,通过改变 LPFG 的曲率,透射光谱向短波长方向移动,中心波长实现从 1 028.3 nm 至 1 039.1 nm 的连续可调,调谐范围为 10.8 nm。相比之下,本文中制备的 LPFG 展现出更宽的调谐范围。



注:(a) LPFG 透射谱测量装置;(b) 自制 ASE 光源光谱;(c) LPFG 滤波器透射谱。

图 2 LPFG 滤波器透射谱测量装置及其光谱特性

Fig. 2 LPFG filter transmission spectrum measurement setup and its spectral characteristics

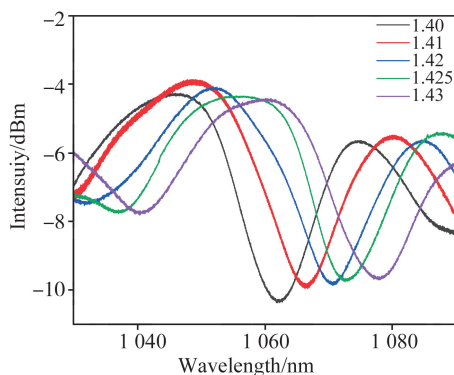


图 3 LPFG 调谐特性

Fig. 3 Tuning characteristics of the LPFG

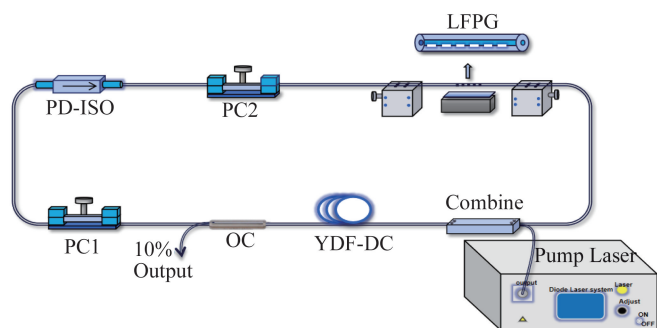


图 4 掺镱锁模激光器装置图

Fig. 4 Setup diagram of the Yb-doped mode-locked laser

4 基于 LPFG 的可调谐锁模激光器的实验装置

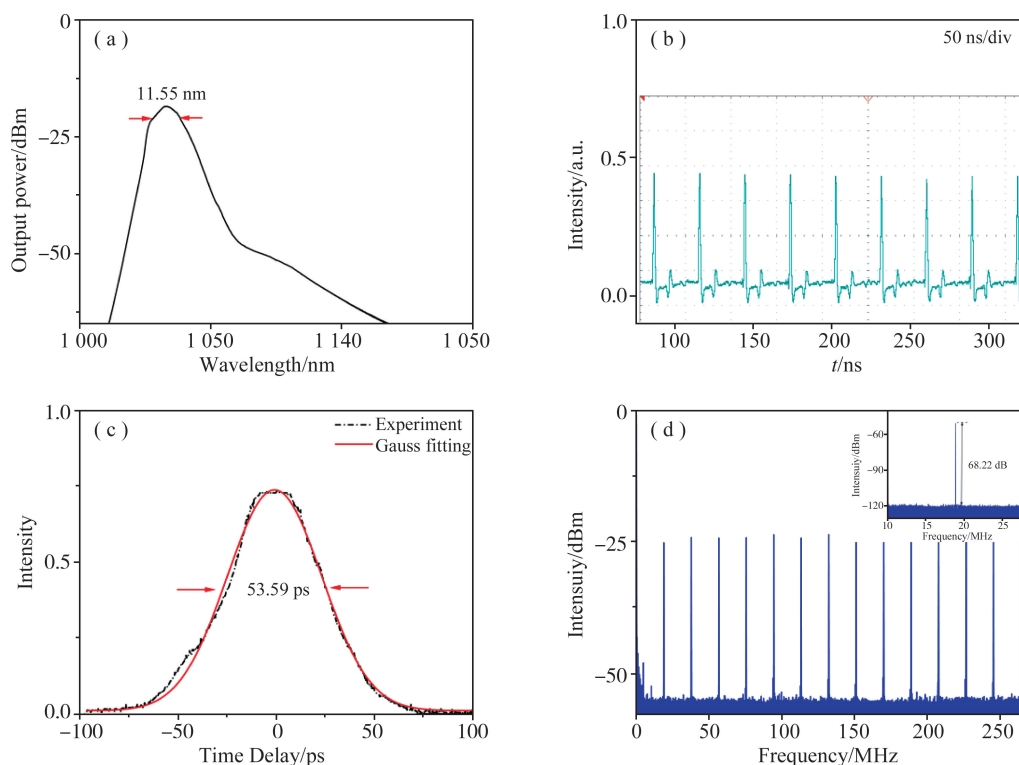
锁模激光器的实验装置如图 4 所示。激光器由泵浦源(Pump Laser)、泵浦/信号合束器(Combiner)、双包层掺镱光纤(YDF-DC)、光纤耦合器(OC)、两个挤压式偏振控制器(PC1, PC2)和偏振相关隔离器(PD-ISO)组成。泵浦光通过泵浦/信号合束器耦合到增益光纤中。增益光纤的长度为 2.2 m,纤芯直径为 10 μm ,包层直径为 125 μm ,在 976 nm 波长下的吸收系数为 7.4 dB/m。光纤耦合器的分光比为 10/90,其

中,10%光用于输出,90%光继续在腔内传输。两个偏振控制器和偏振相关隔离器用于实现非线性偏振旋转锁模,光学隔离器同时用于保证激光的单向传输。总腔长为4.8 m,所用光纤在1 040 nm附近均为正色散。将制作的LPFG悬空拉直,固定在三维位移平台上并熔接到激光器中。在LPFG的正下方设置了一个可升降的平台,通过精准调整升降台的高度,可以使LPFG完全浸泡于不同折射率溶液中。LPFG的透射峰作为窄带滤波器,实现波长选择和调谐。因激光器工作在全正色散域,滤波器还通过频域滤波辅助脉冲整形,维持激光器工作在稳定的锁模状态。

实验中,使用光谱仪分析脉冲光谱特性,光谱仪分辨率设置为0.05 nm。光电探测器(Newport,818-BB-35)连接200 MHz示波器(GWinstek,GDS-2202 E)来监测脉冲序列。使用自相关仪(Femtochrome,FR-103XL)和功率计测量脉冲持续时间和平均功率。为评估激光器工作的稳定性,使用射频(RF)频谱分析仪(Keysight,N9000B)分析激光器的频谱特性。

5 实验结果和讨论

首先将LPFG滤波器悬空拉直,不加任何折射率溶液集成到光纤激光器系统中。当泵浦功率达到1.43 W时,调整两个偏振控制器,可以获得稳定的锁模脉冲。图5(a)显示了当泵浦功率为1.53 W时输出脉冲的特性。脉冲光谱的中心波长为1 032.67 nm,其3 dB带宽为11.55 nm,光谱的中心波长与LPFG的透射峰值波长一致。图5(b)为示波器测量的锁模脉冲序列,重复频率为18.88 MHz。图5(c)展示出了脉冲的自相关轨迹,假设高斯脉冲轮廓,脉冲持续时间约为53.59 ps。对于理想高斯脉冲,时宽带宽积TBP理论最小值为0.441。根据实验数据计算得到的TBP值为174.17,这一数值显著高于理想高斯脉冲的理论最小值0.441,表明当前脉冲不是变换极限脉冲,有望进一步压缩。图5(d)给出了分别以10 Hz和27 MHz的分辨率带宽和扫描范围记录的RF频谱。RF峰值的信噪比为68.22 dB,表明激光器工作在高稳定状态。文献[30]报道了使用飞秒激光制备的小周期光纤光栅,在1 577 nm波长处实现了稳定的锁模脉冲输出。其输出的重复频率为1.54 MHz,带宽为4 nm,信噪比为50 dB。相比之下,本文中的可调谐激光器实现了更高的信噪比,在锁模状态下展现了更强的稳定性。



注:(a) 光谱;(b) 锁模脉冲序列;(c) 自相关轨迹;(d) RF 频谱。

图5 LPFG悬空拉直时的脉冲特性

Fig. 5 Pulse characteristics when LPFG is suspended and straightened

激光器工作时,由于存在模式竞争,工作波长由 LPFG 的透射谱、掺铒光纤的增益谱、偏振控制器引入的滤波器效应以及各器件的滤波效应等共同确定。LPFG 在 1 032 nm 附近具有较强的滤波效应,激光器多数情况下工作在这一波长附近。调节两个偏振控制器,改变不同波长的损耗,在 1 080 nm 附近也可以实现锁模脉冲输出。图 6 展示了在泵浦功率为 1.53 W 条件下,在 1 080 nm 附近生成的锁模脉冲的光谱,其中心波长为 1 081.29 nm,3 dB 带宽为 6.67 nm,光谱中心波长与 LPFG 透射谱最右侧的峰值波长相匹配。由于 1 080 nm 附近滤波器损耗较大,增益光线的增益也比较弱,只偶尔能在 1 080 nm 附近实现锁模。

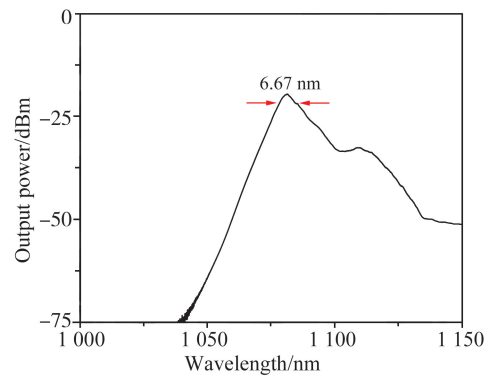
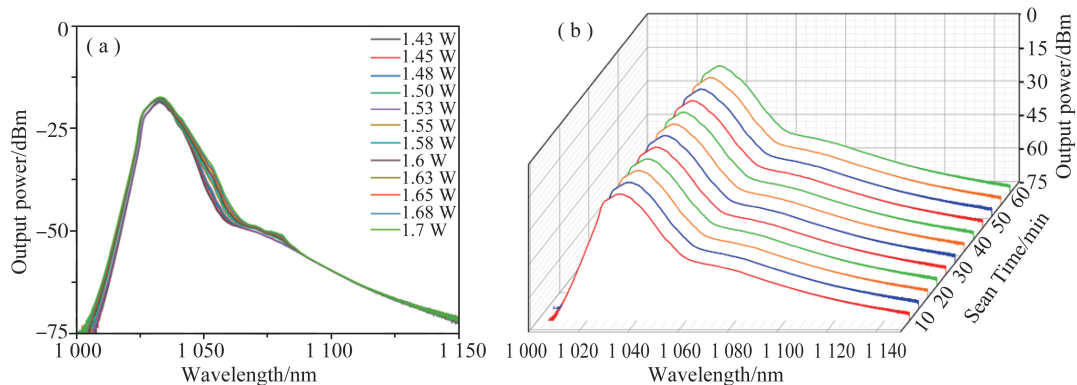


图 6 1 080 nm 附近的锁模脉冲

Fig. 6 Mode-locked pulses around 1 080 nm

当泵浦功率从 1.43 W 增加到 1.7 W 时,激光器始终保持锁模状态,图 7(a)记录了在不同泵浦功率下的脉冲光谱。整个过程中,其 3 dB 带宽在 10.67 nm 至 11.56 nm 之间变化,5 dB 带宽在 13.33 nm 至 15.11 nm 之间变化,10 dB 带宽在 19.11 nm 至 22.23 nm 之间变化。泵浦功率 1.53 W 时,激光器最大输出功率 38.6 mW,相应最大输出脉冲能量 2.04 nJ。我们还测量了 1 小时之内光谱的稳定性。在 1 小时内,每间隔五分钟对波长进行扫描,记录的结果如图 7(b)所示,中心波长在 1 小时内的最大偏移小于 0.2 nm,表明该激光器具有良好的稳定性。



注:(a) 不同功率下脉冲光谱;(b) 1 h 内重复扫描结果。

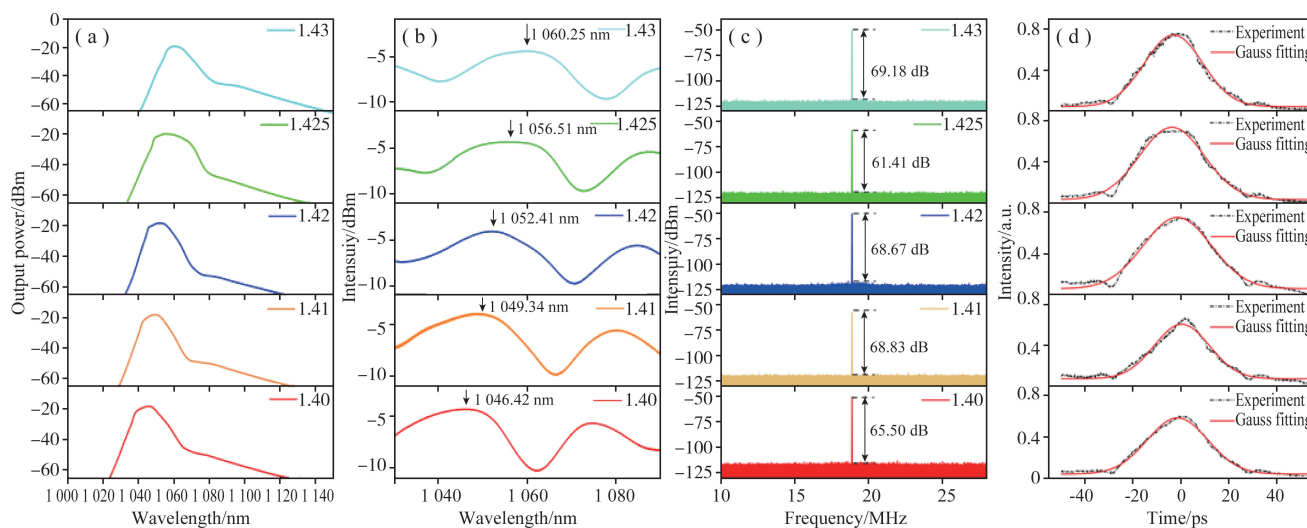
图 7 LPFG 悬空拉直时稳定性测量结果

Fig. 7 Stability measurement results of the LPFG when suspended and straightened

随后,泵浦功率保持在 1.53 W 不变,调节升降台使 LPFG 浸没在不同折射率的溶液中。当溶液折射率从 1.40 增大到 1.43 时,通过调整偏振控制器可以获得不同的锁模脉冲。中心波长从 1 046.42~1 060.25 nm 连续调谐,总共实现了 13.83 nm 的波长调谐范围。图 8(a)给出了中心波长分别为 1 046.42、1 049.34、1 052.41、1 056.51、1 060.25 nm 的光谱,其 3dB 带宽依次为 10.23、9.78、11.56、12.51、9.76 nm。图 8(b)展示了 LPFG 在不同折射率下的透射曲线,所示中心波长与 LPFG 在不同折射率下的窄带滤波范围保持一致。图 8(c)给出了在五组不同折射率下脉冲序列的射频频谱,对应的信噪比分别为 65.50、61.83、68.67、61.41、69.18 dB,均大于 60 dB,证实了此时激光器具有良好的稳定性。图 8(d)所示,使用自相关仪测量不同折射率下脉冲的持续时间,分别为 31.29、35.21、36.21、59.6s 和 56.67 ps。

图 9(a~b)分别展示了光谱带宽、脉冲持续时间、脉冲能量、输出功率与中心波长之间的关系,其波动范围分别为 3.69 nm、26.31 ps、0.13 nJ 和 3.6 mW。文献[31]通过在掺铒锁模光纤激光器中插入不同自由光谱范围的全光纤马赫-曾德尔干涉仪滤波器实现了波长可调谐,其脉冲持续时间、光谱带宽以及脉冲能量的波动范围分别为 1.8 ps、2.6 nm 以及 0.8 nJ。本文在脉冲能量波动方面表现出更高的稳定性,适合于对稳定性要求较高的应用。激光器光谱宽度和脉宽波动范围较大,可能有两方面的原因。首先,如图 3 所示,改

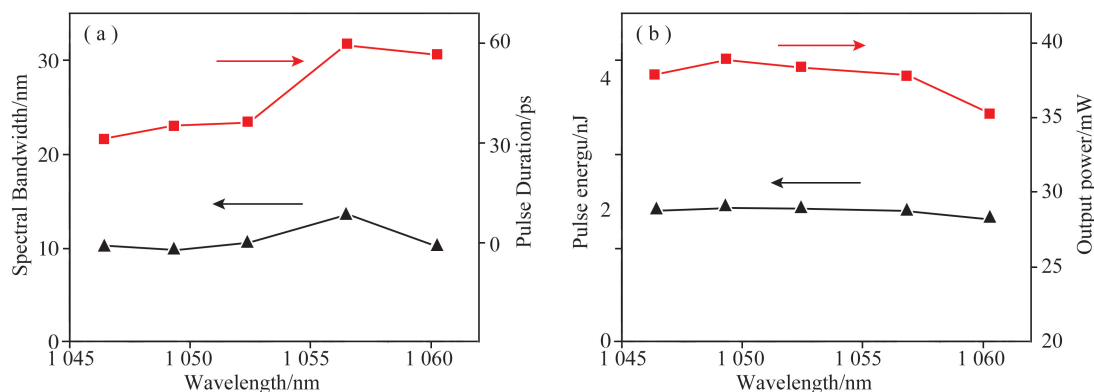
变溶液的折射率时,LPFG 的透射曲线中不止峰值透射波长发生改变,透射光谱的形状也发生了改变,不同的滤波器的形状对脉冲的整形效果不同,从而使得脉冲光谱及脉宽变化较大。其次,在更换折射率溶液时,为使激光器保持稳定的锁模状态,调节了偏振控制器,偏振控制器的角度改变时,非线性偏振旋转的效果随之改变,从而影响了锁模脉冲的光谱和脉宽。



注:(a) 脉冲光谱;(b) LPFG 透射谱;(c) RF 频谱;(d) 自相关轨迹。

图8 调谐结果

Fig. 8 Tuning results



注:(a) 光谱带宽、脉冲持续时间与中心波长的关系;(b) 输出功率、脉冲能量与中心波长的关系。

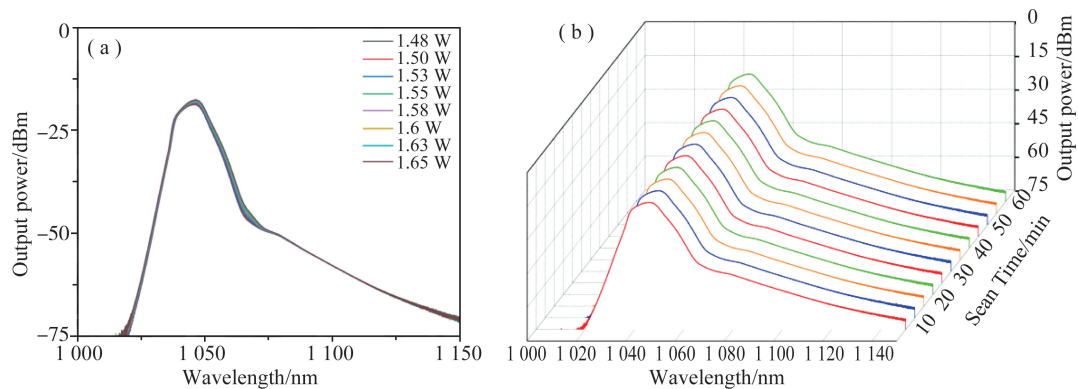
图9 光谱带宽、脉冲持续时间、输出功率及脉冲能量随中心波长变化的关系曲线

Fig. 9 Relationship curves of spectral bandwidth, pulse duration, output power, and pulse energy versus the central wavelength

LPFG 介质折射率为 1.40 时,测量了不同泵浦功率时的输出光谱。10(a)给出了当泵浦功率在 1.48~1.65W 持续改变时,激光器的光谱变化情况。其 3 dB 带宽从 10.22 nm 展宽至 11.12 nm,5 dB 带宽从 13.28 nm 展宽至 13.78 nm 之间变化,10 dB 带宽从 18.67 nm 展宽至 19.56 nm。在室温下,使用光谱分析仪对输出波长进行检测,每间隔五分钟扫描一次,持续 1 h,得到结果如图 10(b)所示。中心波长的波动范围为 1 046.42~1 046.24 nm,最大偏移小于 0.2 nm。证实了当介质折射率为 1.40 时,激光器依然能够保持稳定的锁模脉冲输出。

将本文中提出 LPFG 滤波器与已报道的其他滤波器的结果进行了比较,详见表 1。参考文献[15]描述了 LPFG 集成微流体芯片的可调谐锁模激光器,通过改变微流体芯片内液体的折射率来实现精细的波长调谐,其调谐范围为 4.6 nm。文献[31]讨论了利用马赫-曾德尔干涉仪滤波器的可调谐锁模光纤激光器,使用拉锥的方法控制多芯光纤直径来调节自由光谱范围,实现了 12.36 nm 的波长调谐。拉锥过程降低了光纤的机械轻度,光纤容易损伤。文献[32]提出了 SMF/MMF/SMF 结构作为滤波器,通过改变光纤的物理形

态实现了 9.3 nm 的波长调谐。文献[33]展示了利用 LPFG 作为滤波器,通过弯曲 LPFG 来实现双波长和三波长模式锁定,提供了大约 10 nm 的调谐范围,该系统对外界环境的变化较为敏感。与已报道的调谐结果相比,本文提出的 LPFG 滤波器调谐范围更广。另外,与其他机械弯曲或电学方法调谐方法相比,改变 LPFG 滤波器周围介质折射率具有更高的稳定性和可靠性,减少了对特殊装置的需求,并简化了系统的整体设计。



注:(a) 不同功率下的脉冲输出光谱;(b) 1 h 内重复扫描结果。

图 10 LPFG 悬空拉直时稳定性测量结果

Fig. 10 Stability measurement results of the LPFG when suspended and straightened

表 1 本文所描述的光纤激光器特性与文献报道的结果对比

Tab. 1 Comparison of the characteristics of the fiber laser described in this paper with the results reported in the literature

Ref.	Filter	Tuning method	Gain Fiber	SNR/ dB	PRF/ MHz	3dB bandwidth/nm	Laser Type
[15]	LPFG	refractive index	Er-doped	65	12. 14	3. 5	Mode-locked fiber laser
[31]	MZI	fiber tapering	Yb-doped	60	25. 5	12. 00	Mode-locked fiber laser
[32]	SMF-MMF-SMF	Polarization controller	Er-doped	45. 1	2. 5	0. 249	Mode-locked fiber laser
[33]	LPFG	Bending	Yb-doped	68	2. 499	3. 59	Mode-locked fiber laser
Current work	LPFG	refractive index	Yb-doped	68. 22	18. 88	11. 55	Mode-locked fiber laser

在锁模光纤激光器中,色散是影响锁模特性的一个重要因素。对于 LPFG 的色散,文献[34]指出,均匀 LPFG 能将基模功率耦合到包层模,传输谱中心波长两侧因失谐量变化,使不同波长光的群速度不同,一侧为正色散,另一侧为负色散。通过调整光栅长度和折射率调制,可在合理带宽内实现高色散、低传输损耗及可忽略的延迟纹波,从而用于色散补偿。但这需要大的折射率差($\Delta = 0. 01$)和较长的光纤光栅长度($L = 2$ m)。文献[35]分析了 LPFG 的色散特性,对于长度为 2 cm、周期为 3 μm 且吸收峰耦合波长位于 1. 55 μm 的长周期光纤光栅,其色散系数显著低于 Bragg 光纤光栅,大约只为后者的 1×10^{-5} ,这表明长周期光纤光栅的色散效应极其微弱,几乎可以忽略不计。本实验所刻写的 LPFG 长度仅为 6 000 μm ,依据文献中对 LPFG 色散的分析,可以认为其散补偿量在系统设计中的影响非常小,其色散补偿量在系统设计中可以忽略。

6 结论

综上所述,本文提出并实现了一种基于飞秒激光直写 LPFG 的波长可调谐锁模光纤激光器系统。通过精确直写周期为 50 μm 的 LPFG,实现了光谱的有效滤波,并在掺镱光纤锁模激光器中获得稳定的锁模脉冲。同时,利用周围介质折射率变化,实现了锁模激光器工作波长的调谐。当介质折射率在 1. 40~1. 43 范围变化时,锁模激光器的工作波长的调谐范围为 1 046. 42~1 060. 25 nm。与传统波长调谐方式相比,飞秒激光直写的光纤光栅在结构和参数上具有一定优势,且易于与光纤器件集成。该研究成果为锁模激光器在光通信、光传感以及光学测量等领域提供了一种新的技术方案,具备一定的潜在应用价值。

参 考 文 献

- [1] LI N, DU L, LIU D Y, et al. Highly stable pulsed fiber laser generation modulated by chromium iodide film[J]. *Nanophotonics*, 2023, 12(23): 4329-4337.
- [2] WANG X F, PENG X L, ZHANG J H. Multistate passively mode-locked thulium-doped fiber laser with nonlinear amplifying loop mirror [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(13): 3410-3414.
- [3] WANG T S, MA W Z, ZHANG P, et al. Multi-wavelength narrow linewidth thulium-doped fiber laser operating at 1.9 μm using a tunable Sagnac fiber period filter[J]. *Journal of Optics*, 2015, 44(3): 210-214.
- [4] MÉLO L B A, PALACIOS G F R, CARELLI P V, et al. Deterministic chaos in an ytterbium-doped mode-locked fiber laser[J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 13686-13692.
- [5] LI Z, HEIDT A M, SIMAKOV N, et al. Diode-pumped wideband thulium-doped fiber amplifiers for optical communications in the 1800 ~2050 nm window[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26450-26455.
- [6] FU B, GUI L L, LI X, et al. Generation of 35-nJ nanosecond pulse from a passively mode-locked Tm, Ho-codoped fiber laser with graphene saturable absorber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(15): 1447-1449.
- [7] VOGLER N, HEUKE S, BOCKLITZ T W, et al. Multimodal imaging spectroscopy of tissue[J]. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 2015, 8: 359-387.
- [8] 张熙宇, 许涌, 夏金池, 等. 基于衍射光栅的 LED 光源光谱检测系统设计[J]. *电子制作*, 2023, 31(23): 46-49.
- [9] 高傲, 孔勇, 夏刚, 等. 单轴双折射滤光片温度不敏感性的研究[J]. *激光技术*, 2016, 40(4): 476.
- [10] 张乐, 郭玉彬, 孙铁刚, 等. 基于多模干涉滤波器和双折射滤波器的四波长可开关光纤激光器[J]. *光子学报*, 2016, 45(2): 206001.
- [11] SHI Q, KUHLMEY B T. Optimization of photonic bandgap fiber long period grating refractive-index sensors[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(24): 4723-4728.
- [12] FENG M, CHANG W Z, MAO B W, et al. Efficient generation of Second-order beam Based on angular modulated Long-period fiber grating[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 152, 108131.
- [13] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, et al. Fiber grating sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1442-1463.
- [14] 朱晓军, 许小梅. 可调谐全正色散掺镱光纤激光器[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(11): 3516-3520.
- [15] WANG J, YAO M, HU C Z, et al. Optofluidic tunable mode-locked fiber laser using a long-period grating integrated microfluidic chip [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(6): 1117-1120.
- [16] JIANG J J, MA Y H, WANG M J, et al. L-band filter-less wavelength tunable mode-locked fiber laser incorporating a long-period fiber grating[J]. *Results in Optics*, 2023, 10: 100360.
- [17] 朱涛, 饶云江, 莫秋菊. 高频 CO_2 激光脉冲写入的超长周期光纤光栅[J]. *光子学报*, 2005, 34(11): 1697-1700.
- [18] WANG Y P, WANG D N, JIN W, et al. Asymmetric long period fiber gratings fabricated by use of CO_2 laser to carve periodic grooves on the optical fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(15): 151105.
- [19] XU X Z, HE J, HE J, et al. Slit beam shaping for femtosecond laser point-by-point inscription of high-quality fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(15): 5142-5148.
- [20] KIM H, BAE J, LEE J W, et al. Analysis of concatenated long period fiber gratings having phase-shifted and cascaded effects[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, 42(8): 5098.
- [21] ZHAO Y H, DING M J, TANG M X, et al. Simultaneous measurement of refractive index and curvature based on capillary fiber with structural long-period gratings[J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 176: 110964.
- [22] 金清理, 黄晓虹, 颜利芬, 等. 长周期光纤光栅折射率传感器的结构优化[J]. *光子学报*, 2011, 40(8): 1201-1204.
- [23] 梁辉, 曾庆科, 秦子雄, 等. 长周期光纤光栅的折射率敏感特性[J]. *应用光学*, 2011, 32(1): 111-114.
- [24] LUO W, LIU T J, ZOU D J, et al. Multi-point fiber optic laser-ultrasonic transducer based on long-period fiber grating[J]. *Ultrasonics*, 2024, 137: 107192.
- [25] TAN Y Z, LI Z R, HUANG T S, et al. Advances in dispersion turning point enhanced ultrasensitive optical fiber refractive index sensors [J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 177: 111084.
- [26] HECK M, SCHWARTZ G, KRAMER R G, et al. Control of higher-order cladding mode excitation with tailored femtosecond-written long period fiber gratings[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 4292-4303.
- [27] 张亚妮, 郝亚茹, 江鹏, 等. 飞秒激光直写长周期光纤光栅及其光谱特性[J]. *光子学报*, 2018, 47(11): 7-14.

(下转第 881 页)

- [15] LI X Y, ZHANG W G, CHEN L, et al. Helical fiber interferometer using flame-heated treatment for torsion sensing application[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 29(1): 161-164.
- [16] YANG K, LIU Y G, WANG Z, et al. Twist sensor based on long period grating and tilted Bragg grating written in few-mode fibers[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(3): 1-8.
- [17] YING G L, FU Q J, YANG P X, et al. Direction-discriminating torsion sensor based on optical fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 156: 108461.
- [18] 张平, 刘彬, 刘正达, 等. 基于氧化石墨烯涂层的侧抛光纤马赫-曾德尔干涉仪温湿度传感器[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(3): 0306003.
- [19] 杨翔文, 罗彬彬, 石胜辉, 等. 基于虚拟游标效应的夹层多模光纤马赫-曾德尔干涉仪高灵敏温度传感器[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(17): 1706002.
- [20] 孙翔宇, 陈智, 王宇莹, 等. 飞秒激光直写光波导放大器与激光器[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(3): 0314003.
- [21] FU X H, MA S Y, ZHANG Y X, et al. Seven-core fiber torsion sensor with microcavity structure based on intensity measurement[J]. Optics Communications, 2022, 502: 127412.

(责任编辑:赵海军)

(上接第 873 页)

- [28] NG M N, CHIANG K S. Thermal effects on the transmission spectra of long-period fiber gratings[J]. Optics Communications, 2002, 208(4/5/6): 321-327.
- [29] ZHONG X Y, WANG Y P, LIAO C R, et al. Long period fiber gratings inscribed with an improved two-dimensional scanning technique [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(4): 2201508.
- [30] LI Q Y, CHENG P Y, ZHAO R, et al. Mode-locked fiber laser based on a small-period long-period fiber grating inscribed by femtosecond laser[J]. Optics Letters, 2023, 48(9): 2241-2244.
- [31] YANG F, ZHANG L Q, WANG M H, et al. Wavelength-tunable mode-locked fiber laser based on an all-fiber Mach-Zehnder interferometer filter[J]. Chinese Optics Letters, 2023, 21(4): 041401.
- [32] KHATTAK A, TATEL G, WEI L. Tunable and switchable erbium-doped fiber laser using a multimode-fiber based filter[J]. Applied Sciences, 2018, 8(7): 1135.
- [33] ZHU X J, WANG C, ZHANG G A, et al. Tunable dual-and triple-wavelength mode-locked all-normal-dispersion Yb-doped fiber laser [J]. Applied Physics B, 2015, 118(1): 69-73.
- [34] GRUBSKY V, FEINBERG J. High-dispersion long-period fiber gratings for dispersion compensation[J]. Optics Letters, 2000, 25(4): 203-205.
- [35] 孔梅, 汤伟中, 周文. 长周期光纤光栅的相移和色散特性[J]. 半导体光电, 1999, 20(1): 47-49.

(责任编辑:赵海军)