

基于氧化铜可饱和吸收体的掺铒光纤激光器

张亚妮 武柯欣 苗挺 薛佳 姚一鸣

Erbium-doped fiber laser based on copper oxide saturable absorber

ZHANG Ya'ni, WU Kexin, MIAO Ting, XUE Jia, YAO Yiming

引用本文:

张亚妮, 武柯欣, 苗挺, 等. 基于氧化铜可饱和吸收体的掺铒光纤激光器[J]. 应用光学, 2023, 44(3): 684–692. DOI: 10.5768/JAO202344.0308001

ZHANG Ya'ni, WU Kexin, MIAO Ting, et al. Erbium-doped fiber laser based on copper oxide saturable absorber[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(3): 684–692. DOI: 10.5768/JAO202344.0308001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0308001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于 WS_2 可饱和吸收体的脉冲激光器研究

Pulse lasers based on WS_2 saturable absorber

应用光学. 2018, 39(2): 279–283 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0207003>

基于多波长类噪声脉冲的掺铒光纤激光器

Multi-wavelength noise-like pulsed erbium-doped fiber laser

应用光学. 2019, 40(4): 710–716 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0408003>

高重复频率锁模光纤激光器及其超连续谱产生

High repetition-rate mode-locked fiber laser and generation of supercontinuum

应用光学. 2018, 39(6): 916–920 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0607001>

高信噪比多波长 $2\ \mu\text{m}$ 主动锁模光纤激光器

High SNR multi-wavelength $2\ \mu\text{m}$ actively mode-locked fiber laser

应用光学. 2021, 42(1): 194–199 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0108001>

$2.1\ \mu\text{m}$ 可调谐多波长掺铒光纤激光器

Tunable multi-wavelength holmium-doped fiber laser operating at $2.1\ \mu\text{m}$

应用光学. 2019, 40(3): 500–504 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0307003>

位于第三近红外窗口的平坦光纤超连续谱产生

Flat fiber super-continuum spectrum generation in the third near-infrared window

应用光学. 2021, 42(3): 565–570 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0308002>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 03-0684-09

基于氧化铜可饱和吸收体的掺铒光纤激光器

张亚妮, 武柯欣, 苗 挺, 薛 佳, 姚一鸣

(陕西科技大学 文理学院, 陕西 西安 710021)

摘 要: 报道了一种基于氧化铜 (copper oxide, CuO) 材料可饱和吸收体 (saturable absorber, SA) 的孤子锁模掺铒光纤激光器 (erbium-doped fiber laser, EDFL)。通过将液相沉淀法制备的氧化铜沉积在锥形光纤上作为 SA 被动锁模器件。当泵浦功率为 233.6 mW 时, 在中心波长 1 530.2 nm 处获得了脉冲宽度为 1.23 ps 的传统孤子, 其基本重复频率为 5.34 MHz, 脉冲能量和平均输出功率分别为 1.37 nJ 和 2.2 mW。此外, 当泵浦功率增加到 329 mW 时, 首次在中心波长 1 529.6 nm 处观察到了束缚态孤子脉冲, 其光谱调制周期为 3 nm, 脉冲分离度为 2.6 ps。研究结果表明, CuO 材料是超快光纤激光器的好 SA 候选材料。

关键词: 光纤激光器; 被动锁模; 掺铒光纤; 可饱和吸收体

中图分类号: TN248

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0308001

Erbium-doped fiber laser based on copper oxide saturable absorber

ZHANG Ya'ni, WU Kexin, MIAO Ting, XUE Jia, YAO Yiming

(School of Arts and Sciences, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

Abstract: A soliton mode-locked erbium-doped fiber laser (EDFL) was reported using copper oxide (CuO) material as a saturable absorber (SA). The CuO material was prepared by liquid phase precipitation method and deposited on the tapered fiber as a passive mode-locked device. When the pump power was 233.6 mW, the traditional soliton pulses with a pulse width of 1.23 ps were obtained at the central wavelength of 1 530.2 nm, with a basic repetition frequency of 5.34 MHz and the pulse energy as well as average output power of 1.37 nJ and 2.2 mW, respectively. In addition, when the pump power was increased to 329 mW, the bound-state soliton pulses were first observed at the central wavelength of 1 529.6 nm, with a spectral modulation period of 3 nm and a pulse separation of 2.6 ps. The results show that the CuO materials are good SA candidates for ultrafast fiber lasers.

Key words: fiber laser; passive mode-locking; erbium-doped fiber; saturable absorber

引言

超短脉冲因其在光通信、非线性光学、生物医疗和材料微加工等领域的潜在应用而备受关注^[1-2]。如今, 超快光纤激光器的蓬勃发展已经彻底改变了超快光子学领域。作为第三代激光技术的代表, 光纤激光器具有制造成本低、小型化、激光阈值低等优点。此外, 光纤激光器的谐振腔中没有光学透镜, 其呈现的免调节、免维护和高稳定性等

优势是传统激光器无法比拟的。同时, 光纤激光器容易适应恶劣的工作生活环境, 对灰尘、湿度和温度有很高的耐受性。通常, 光纤激光器可以在连续波、调 Q 和锁模模式下工作^[3-5]。锁模技术是产生超短脉冲 (~ps 至 ~fs) 和高重复频率 (~MHz 至 ~GHz) 脉冲输出的有效途径。锁模操作可以通过主动或被动技术来实现。主动锁模技术通常使用声光或者电光效应将外部信号应用于光损耗调

收稿日期: 2022-11-18; 修回日期: 2023-02-14

基金项目: 陕西省科技厅重点研发计划-国际科技合作计划 (2021KWZ-11); 国家留学基金 (202208615033); 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室 (SKLST202223); 陕西省技术创新引导专项基金 (2021QFY03-02, 2022QFY04-03); 陕西省西安市科技计划 (22GXFW0009)

作者简介: 张亚妮 (1966—), 女, 博士, 教授, 主要从事太赫兹生物传感、超快光子学及器件研究。E-mail: zhangyn@sust.edu.cn

制器, 外部信号驱动调制器对激光腔内光场实现周期性的幅度或者相位调制, 当调制频率与纵模间隔相等时, 可实现锁模, 但环境扰动会影响调制频率, 从而引发锁模的不稳定性。此外, 外部调制器的固有电子速度限制脉冲持续时间在 1 ps~100 ps 的范围内, 也增加了系统的复杂性^[6]。被动锁模的关键技术是需要激光谐振腔中插入可饱和吸收体(saturable absorbers, SAs), 用于获得激光谐振腔内光的自振幅调制, 并利用其非线性特性实现脉冲窄化, 从而得到超短脉冲输出^[7]。与主动锁模技术相比, 被动锁模技术具有操作简单、响应快速、易于实现等优越性能^[8]。

上世纪 90 年代, 研究人员广泛提出并研究了通过在激光腔中嵌入半导体可饱和吸收镜(semiconductor saturated absorption mirror, SESAM)作为光纤激光器的 Q 开关和被动锁模器件^[9-10], 但其存在操作带宽有限, 成本高以及制造工艺复杂等固有缺点。随后, 以碳纳米管和石墨烯为代表的低维材料所表现出的优异光学特性激发了研究人员对材料 SAs 被动锁模技术的研究热潮。2008 年, Fumio Shohda 等人基于碳纳米管 SA 在掺铒光纤激光器中获得了 115 fs 的超短脉冲输出^[11]。2009 年, 深圳大学 Zhang 和南洋理工大学 Bao 等人率先使用石墨烯 SA 在掺铒光纤激光器中, 实现了脉冲宽度为 756 fs 的超短脉冲输出^[12]。然而, 碳纳米管具有较低损伤阈值, 其工作波长取决于碳纳米管的直径^[13]; 石墨烯具有弱吸收系数及低损伤阈值^[14]等, 种种因素也激发了研究人员对其他新型低维材料的研究, 如拓扑绝缘体(topology insulators, TIs)和过渡金属硫化物(transition metal dichalcogenides, TMDs)。其中, Bi₂Te₃ 和 MoS₂ 等也陆续被证明是用于产生超短脉冲的被动锁模掺铒光纤激光器(erbium-doped fiber laser, EDFL)的有效非线性 SAs 材料。2014 年, Lin 等人基于 TI-Bi₂Te₃ SA 获得了 436 fs 的超快激光^[15]。2016 年, M.H.M. Ahmed 等人基于 TMD-MoS₂ SA 在掺铒光纤激光器中获得了 630 fs 的超短脉冲输出^[16]。尽管如此, 现有低维材料如 TIs 和 TMDs 分别因复杂的制造工艺和相对较宽的禁带限制了其作为 SAs 在超快光纤激光器中的应用^[17-18]。不同于以上低维材料, 黑磷(black phosphorus, BP)因其具有通过控制厚度可调控其带隙宽窄的优势, 在超快光纤激光器中获得广泛应用。2016 年, E. I. Ismail 等人基于 BP-SA 成功在掺铒光纤激

光器中实现了调 Q 和锁模操作^[19]。然而, BP 长时间暴露在空气中时, 损伤阈值由于氧化效应而不断降低, 从而极大影响了可饱和吸收性能^[20]。过渡金属氧化物(transition metal oxides, TMOs)具有优异的非线性光学特性、良好的热稳定性和化学稳定性以及机械强度等优点, 尽管在如气体传感器、太阳能电池、场致发射体、光伏器件和光开关等光电领域显示出巨大的应用潜力, 然而其被作为 SAs 应用于超快光纤激光器中的研究甚少^[21-23]。直到最近, 这些具有快速恢复时间和适当调制深度的 TMO(如, ZnO、Al₂O₃、TiO₂)才被开发为 SAs 应用于光纤激光器中^[24-26]。2017 年, H. Ahmad 等人基于 ZnO SA 成功实现了双波长锁模掺铒光纤激光器^[24]。2021 年, M.H.M. Ahmed 等人展示了一种基于 TiO₂ SA 的掺铒锁模光纤激光器, 其脉冲宽度窄至 1.5 ps^[27]。CuO 作为 TMOs 中另一种具有窄带隙的半导体化合物, 呈现出非常理想的优势, 例如高三阶光学非线性效应, 适当的损伤阈值以及在皮秒范围内表现出超快弛豫和复合动力学时间等, 也被视为超快光纤激光器应用中 SA 的理想候选材料, 从而备受研究人员青睐^[28-29]。

本文采用液相沉淀法制备 CuO 样品, 通过光脉冲沉积技术将其沉积在锥形光纤上, 制备成 SA 器件并与掺铒光纤激光器环形谐振腔耦合, 成功在掺铒光纤激光器中获得了传统孤子与束缚态孤子脉冲。传统孤子脉冲工作于波长 1 530.2 nm 处, 其重复频率和脉冲宽度分别为 5.34 MHz 和 1.23 ps。稳定束缚态孤子脉冲工作在波长 1 529.6 nm 处, 输出的重复频率和脉冲间隔分别为 6.28 MHz 和 159 ns。其光谱的调制周期为 3 nm。利用双曲正割多峰曲线对自相关测量结果进行拟合, 发现其脉冲宽度为 1.09 ps。两个脉冲之间的间隔大小为 2.6 ps, 与光谱调制周期相对应, 该激光器最大输出功率和脉冲能量分别为 2.2 mW 和 1.37 nJ。

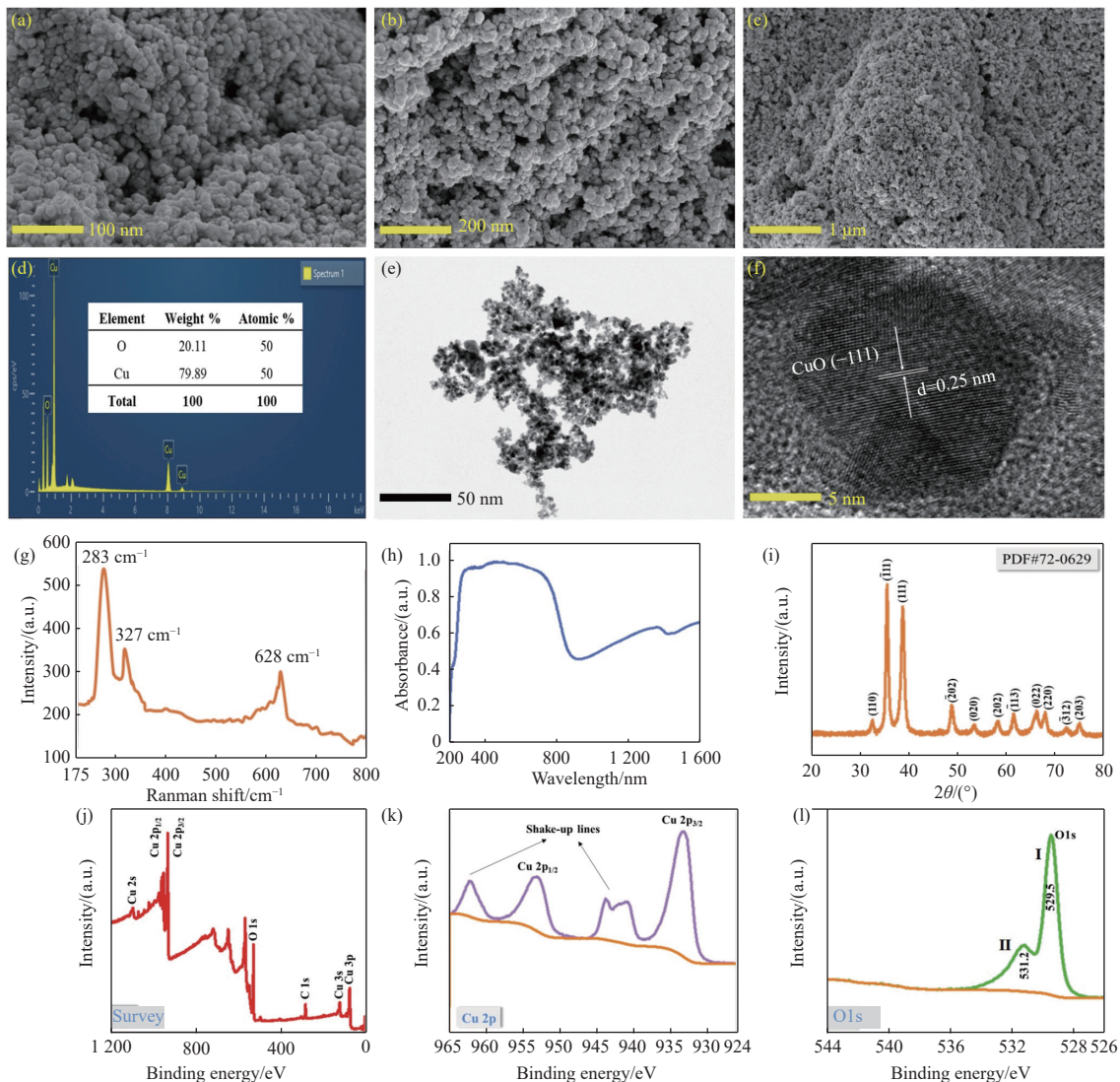
1 材料与方法

1.1 材料制备与表征

采用液相沉淀法制备 CuO 材料。室温下取物质的量浓度为 0.1 mol·L⁻¹ 的 CuSO₄ 溶液 100 mL, 加入木质素磺酸钙 1 g, 搅拌溶解, 在连续搅拌下, 逐滴滴入 2 mol·L⁻¹ NaOH 溶液 10 mL, 在 50 ℃ 下加热回流 5 h, 冷却至室温, 将所得沉淀混合物离心分离, 沉淀物用去离子水清洗 2 遍, 再用无水乙醇

清洗2遍,离心分离,分离后的固体放入恒温干燥箱中60℃干燥11h,然后将干燥后的固体于350℃

温度下焙烧2h,即得到黑色CuO颗粒。制备得到的CuO材料特性如图1所示。



(a), (b) 和 (c) CuO 的 SEM 图像, 分辨率分别为 100 nm、200 nm 和 1 μm; (d) CuO 的 EDX 光谱; (e) 和 (f) CuO 的 TEM 和 HRTEM 图像; (g) CuO 的 UV-VIS-NIR 光谱; (h) CuO 的拉曼光谱; (i) CuO 的 XRD 图谱; (j) CuO 全谱图; (k) Cu 2p 光谱; (l) O 1s 光谱

图1 CuO 材料特性

Fig. 1 Material properties of CuO

图1(a)、1(b)和1(c)分别是CuO在不同分辨率下(100 nm、200 nm以及1 μm)的SEM图像,SEM图像表明CuO具有类球状的形貌特征。图1(d)中的EDX光谱显示,样品由Cu和O组成,定量分析结果表明,Cu和O的原子比非常接近1:1的化学计量。为了更详细地研究CuO的形貌,通过TEM进一步表征了其微观结构。图1(e)和1(f)显示了CuO的典型TEM和HRTEM图像,TEM图像可以观察到明显的类球形颗粒结构,HRTEM图像显示了CuO间距为0.25 nm的晶格条纹来自(-111)晶面。CuO的UV-VIS-NIR光谱如图1(g)所示,样品

在200 nm~1800 nm之间被吸收,最大强度的吸收峰在466 nm附近。图1(h)展示了CuO的拉曼(Raman)光谱,CuO的Raman光谱中在283 cm⁻¹、327 cm⁻¹和628 cm⁻¹呈现出3个Raman散射峰,该研究结果与CuO的拉曼特征峰相符。283 cm⁻¹处的Raman峰相对较强,与Ag模式对应,327 cm⁻¹和628 cm⁻¹处的Raman峰较弱,对应Bg模式,证明制备的CuO材料具有单相结构。除此之外,采用XRD精确分析材料的成份,如图1(i)所示,XRD图谱具有丰富的谱线特性,衍射峰高度有序,证明了CuO材料的纯度,同时也进一步证实了CuO的

单相结构。图 1(j)、1(k) 和 1(l) 显示了利用 x 射线光电子能谱(XPS)对制备的 CuO 样品的纯度和元素组成的检测结果。图 1(j) 为 CuO 的全谱图, 全谱图包含 C、O 和 Cu 元素的突出峰。图 1(k) 为 Cu 2p 谱, 显示了在 933.2 eV 处检测到 Cu 2p_{3/2} 峰位, 两个振荡卫星的结合能分别比主峰高 7.9 eV 和 10.6 eV, 这些特征对应于铜原子的 Cu²⁺态。图 1(l) 表明 O 1s 核心能级谱很宽, 通过曲线拟合可以求解出两个高斯峰(标记为 I 和 II), 峰 I 的能量较低, 为 529.5 eV, 与 CuO 中的 O²⁻一致; 而峰 II 的能量较高, 为 531.2 eV, 是由于 O 被吸附在 CuO 颗粒表面。因此, XPS 结果证明样品由 CuO 组成。表征结果显示 CuO 被高质量制备, 为后续 CuO 作为高效的 SA 材料提供了可能。

1.2 可饱和吸收体的制备

CuO-SA 器件的制备过程如图 2 所示。SAs 是材料与光纤耦合以实现被动锁模的关键器件。目前, 制备 SAs 的方法多种多样, 最常见的方法包括将材料与锥形光纤、D 形光纤结合的倏逝波耦合方式以及通过光纤连接器实现的传输耦合方式。本文选择锥形光纤作为 SA 器件的基底材料, 该方法简单易操作, 同时具有更长的材料与激光的相互作用距离, 能有效提高器件的非线性和损伤阈值。其中, 锥形光纤制备如图 2(a) 所示, 剥离光纤涂覆层, 在光纤两端施加力的作用下用酒精灯外焰对剥离区域进行加热拉伸。通过高温拉伸, 得到了损耗值约为 35% 的锥形光纤。图 2(b) 显示了 CuO-SA 的制备。首先, 将纳米 CuO 溶于乙醇形成

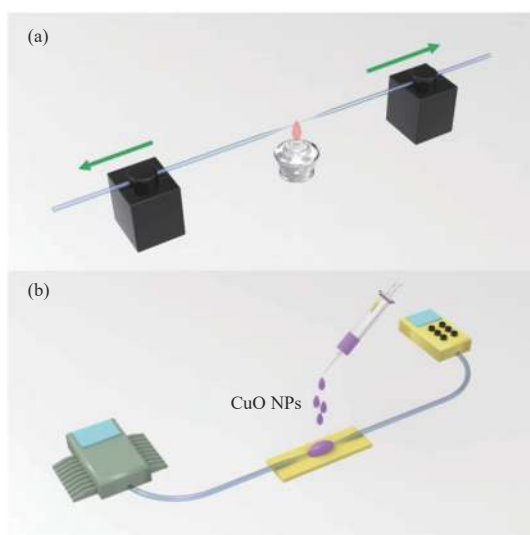


图 2 可饱和吸收体制备

Fig. 2 Fabrication of saturable absorbers

分散溶液, 随后, 通过光脉冲沉积技术将均匀分散溶液沉积在锥形光纤腰部, 实现了光与物质的相互作用。具体来说, 光脉冲沉积技术是指当 1.5 μm 的连续波通过锥形光纤时, 将 CuO 分散液滴落到锥形光纤腰部, CuO 纳米材料将沿温度梯度粘附在锥形光纤上。至此, CuO-SA 器件制备完成, 将其嵌入激光腔中可实现可饱和吸收效应。

接下来, 搭建了双臂测量装置探究 CuO-SA 器件的非线性光学特性, 其实验装置如图 3 所示。NPR 锁模激光器(中心波长为 1 550 nm)作为泵浦源(Pump), 负责为整个系统提供光脉冲。衰减器(Attenuator)的作用是调节激光脉冲的输出功率。50% : 50% 的光耦合器(OC)将输出的激光脉冲分成两束, 一束为测量光路, 经过 CuO-SA 器件并连接功率计(Power), 另一束则作为参考光路连接第二个功率计。两个功率计完全一致保证实验结果准确性。计算两个功率计的比值则为 CuO-SA 器件对光的透射率。通过调节泵浦源改变输出功率的大小, 最终得到 CuO-SA 器件的非线性饱和吸收特性。CuO-SA 器件的非线性饱和吸收曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 随着激光强度的逐渐增加, CuO-SA 器件的吸收率逐渐降低, 进而呈现出饱和和吸收状态。

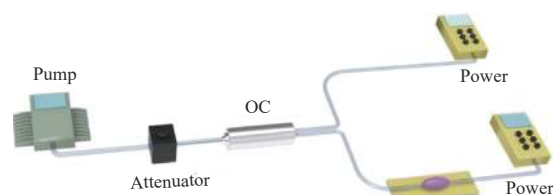


图 3 双臂测量装置

Fig. 3 Experiment diagram of two arm measurement

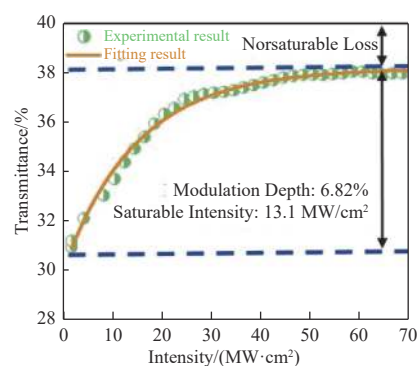


图 4 非线性饱和吸收曲线

Fig. 4 Nonlinear saturation absorption curve

整个状态可用公式(1)表示:

$$\alpha(I) = \alpha_{\text{ns}} + \frac{\alpha_s}{1 + I/I_{\text{sat}}}$$

(1)

式中： α_{ns} 是非饱和损失； α_s 是调制深度； I_{sat} 是饱和强度。当光子能量大于材料的带隙时，光子可以被 SA 器件吸收。当入射光强较弱时，该 SA 器件的吸收近似为线性。但当入射光强 I 接近饱和光强 I_{sat} 时，SA 器件会呈现出非线性光吸收特性。实验研究表明，CuO-SA 器件的饱和光强和调制深度分别为 13.1 MW/cm^2 和 6.82% 。表 1 中对比了不同过渡金属氧化物材料 SAs 的非线性光学参数。相较而言，CuO-SA 具有合适的调制深度与较小的饱和强度，由此表明 CuO-SA 器件具有良好的非线性吸收特性，可用于激光调制。

表 1 不同过渡金属氧化物的掺铒光纤激光器在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长的性能比较

Table 1 Performance comparison for EDFLs based on various TMOs at $1.55 \mu\text{m}$ wavelength

SA	调制深度/%	饱和强度/ MW/cm^2	重复频率/ MHz	脉冲宽度/ ps	脉冲能量/ nJ	参考文献
NiO	39	0.04	0.96	0.95	1.14	[30]
ZnO	5	60	3.26	2.6	2.12	[31]
CuO	3.5	3.3	0.983	1.7	1.29	[32]
V_2O_5	7	71	1	3.14	4.44	[33]
Lu_2O_3	10	100	0.97	2.12	7.64	[34]
MgO	32.4	16	3.5	5.6	2.17	[35]
WO_3	20	0.04	1.85	2.69	1.14	[36]
CuO	6.82	13.1	5.34	1.23	1.37	本工作
			6.28	1.09	—	

2 实验装置

掺铒光纤激光器实验装置如图 5 所示。采用波长为 976 nm 的半导体二极管作为泵浦源。长度为 0.3 m 、吸收系数为 20 dB/m 、波长约为 1530 nm 的掺铒光纤作为激光增益介质，为谐振腔提供增益。泵浦源经过一个三合一器件(WDM/ISO/OC)，其中， $980 \text{ nm}/1550 \text{ nm}$ 波分复用器(WDM)对波长进行合并或分离；偏振无关隔离器(PI-ISO)保证脉冲单向传输，消除端面反射光，从而提高脉冲信噪比；光纤耦合器(OC)输出 30% 激光，剩余 70% 激光继续参与腔内振荡。全光纤偏振控制器(PC)通过改变光纤双折射来调节光纤中激光传输的偏振状态； 40.2 m 单模光纤(SMF)以增加腔中的非线性和色散。CuO-SA 置于激光腔中实现非线性吸收

锁模。除增益光纤外，谐振腔内使用的其余光纤为标准单模光纤(SMF-28)。OC 输出的激光参数通过以下仪器进行测试分析：其型号分别为 Rigol DS6104 的数字示波器 (1-GHz)，Anritsu MS9710C 光谱分析仪(分辨率 0.02 nm)，Rohde & Schwarz FSC6 频谱仪(2 GHz)及 FR-103XL 自相关仪。

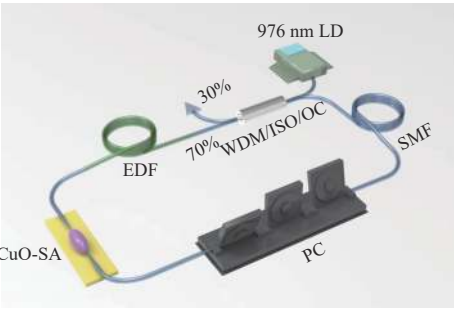


图 5 锁模掺铒光纤激光器实验装置
Fig. 5 Experimental device of mode-locked EDFA

3 实验结果与分析

首先，为了测试 CuO-SA 器件的锁模效果，在激光腔中暂时不接入 CuO-SA，调节泵浦功率和 PC 的状态，并未实现锁模脉冲。然后，将 CuO-SA 器件接入环形激光腔中，适当调整 PC 以及泵浦功率，当泵浦功率达到 233.6 mW 时，成功在光纤激光器中实现了传统孤子锁模。由此可知，CuO-SA 器件在模式锁定中至关重要。传统孤子脉冲输出具有双曲正割轮廓，其谱具有明显的凯利边带。凯利边带是由非线性效应和光纤色散之间的平衡形成的。谐振腔内的色散波进行干涉产生了凯利边带，其一般位于中心波长的两端，与中心波长距离越近，其强度越大。图 6 展示了其脉冲输出特性。其中图 5(a) 为传统孤子的输出光谱，其光谱中心波长为 1530.2 nm ， 3 dB 带宽为 3.4 nm ，光谱图中可以观察到由于脉冲和色散波在激光腔内的干涉所导致的明显凯利边带；图 6(b) 为激光器典型的输出脉冲序列，脉冲间隔为 184 ns ；图 6(c) 为脉冲的射频光谱，中心峰位于 5.34 MHz 处，与脉冲间隔相对应，同时，激光器的信噪比高达 53 dB ，这表明激光器锁模状态非常稳定；图 6(d) 为输出脉冲的自相关轨迹，利用双曲正割曲线对其进行拟合，得到的脉冲宽度为 1.23 ps 。功率计测得最大输出功率为 2.2 mW ，时间带宽积(TBP)值计算为 0.337 ，略大于理论值 0.315 ，表示脉冲具有轻微啁啾。激光器的输出脉冲能量为 1.37 nJ 。

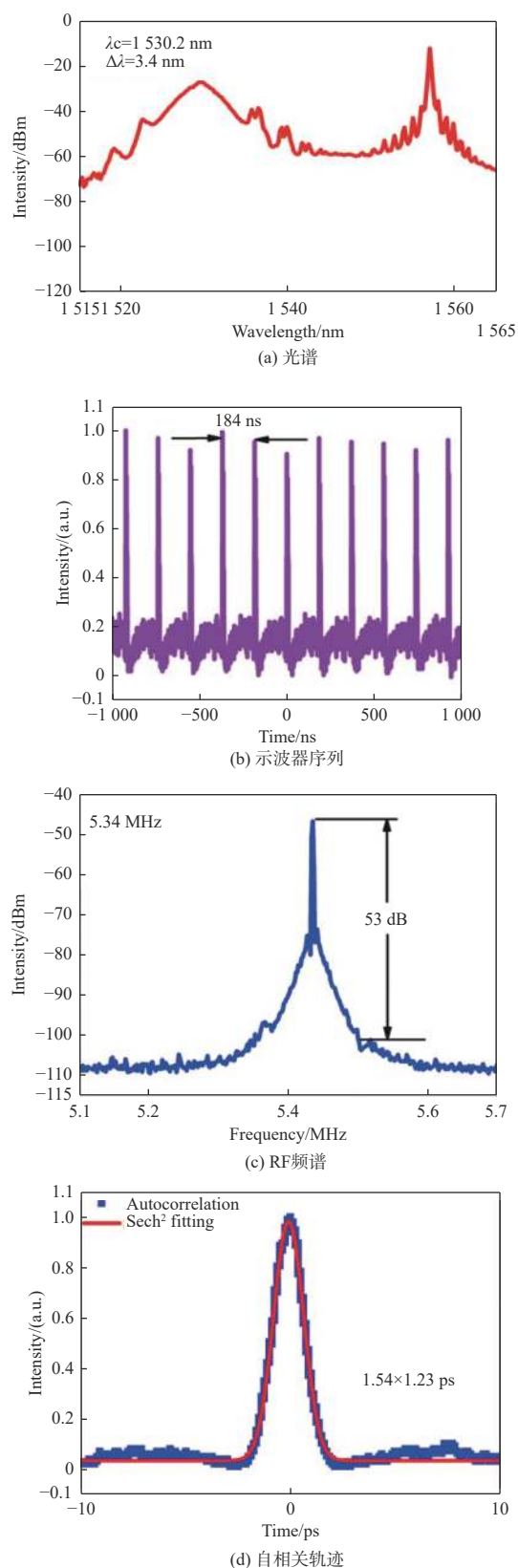


图6 传统孤子输出特性

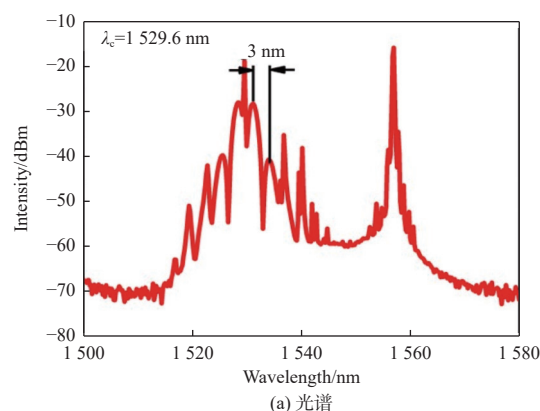
Fig. 6 Output characteristics of traditional soliton

继续调节光纤激光器的泵浦功率以及激光腔内偏振态,当泵浦功率为 329 mW 时,激光器获得

了稳定的束缚态孤子脉冲输出。束缚态孤子脉冲作为一种束缚的孤子形态,由多个子脉冲组成,是由非线性效应、色散效应、增益和损耗等许多效应复杂作用所引起的孤子之间的斥力和引力平衡的结果。由于被动锁模光纤激光器只能承受一定程度的非线性相移,高泵浦功率会导致腔内脉冲分裂和多个脉冲共存,这种平衡导致几个相同的脉冲(完全相同的强度,以及相同的光谱和时间分布)被捆绑起来,并在相邻脉冲之间保持恒定的时间间隔和固定的相位差^[37]。图7展示了掺铒锁模光纤激光器中束缚态孤子脉冲的输出特性。其中图7(a)为光谱图,其中心波长为 1 529.6 nm,输出脉冲的光谱调制周期为 3 nm;图7(b)为束缚态孤子的输出脉冲序列,脉冲间隔为 159 ns;图7(c)为束缚态脉冲输出的射频频谱,从中可以看出其重复频率为 6.28 MHz;图7(d)为利用双曲正割曲线进行多峰拟合的自相关曲线,束缚态脉冲输出具有 3 个峰,表明谐振腔内有两个脉冲被束缚在一起进行传输。经过测量,脉冲宽度为 1.09 ps,两个脉冲之间的间隔大小为 2.6 ps。光谱调制周期与脉冲之间的间隔大小具有一定的关系,具体可以通过以下公式表示:

$$\Delta t = \left| \lambda_c^2 / (c \times \Delta \lambda) \right| \quad (2)$$

式中: λ_c 为光谱中心波长; Δt 为脉冲之间的间隔大小; $\Delta \lambda$ 为光谱调制周期; c 为真空光速。脉冲之间的间隔大小和光谱调制周期为反比关系。束缚态孤子脉冲是由 Malomed 在扩展非线性薛定谔方程系统中理论上预测,并由 Akhmediev 等人在复杂的 Ginzburg-Landau 方程系统中研究而提出,其对于理解和探索锁模光纤激光器的内在物理机制具有重要意义,是光纤激光器中能够观察到的复杂非线性动力学现象,对于探索潜在的耗散性质具有极大的帮助作用;同时,对于开发光纤传输线



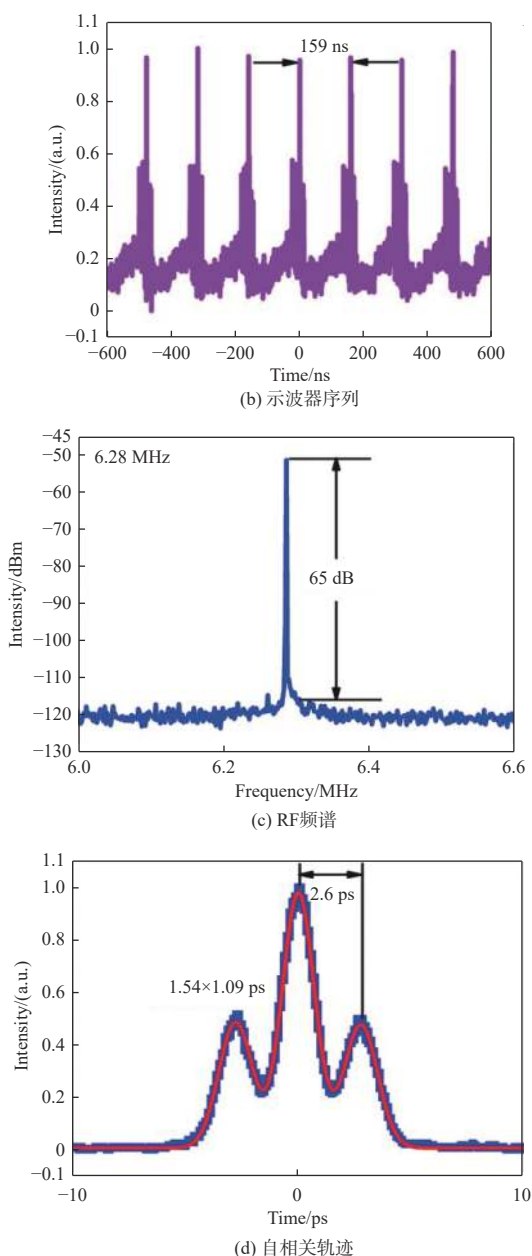


图7 束缚态孤子输出特性

Fig. 7 Output characteristics of bound-state soliton

路中更大的通信容量具有积极的促进作用。此外,束缚态孤子脉冲在光纤通信、材料加工和相干脉冲叠加放大等多种领域中呈现出巨大的应用潜力。

表1将本文所提出的CuO-SA与基于其他过渡金属氧化物纳米材料SAs的锁模光纤激光器的性能进行了比较。可以看出,CuO的调制深度和饱和强度相对较高,可以与其他报道的SAs相媲美。而且,CuO-SA所演示的锁模EDFL的重复频率、脉冲宽度和脉冲能量等参数与其他材料相比亦呈现明显的优势。由此可见,CuO-SA在超快光

纤激光器中呈现极好的锁模性能。并且,相较于其他过渡金属氧化物,基于CuO-SA的超快光纤激光器锁模稳定、性能优良。

近年来,基于低维材料的超快光纤激光器由于其高性价比和优良性能在医疗、材料加工和通信等领域备受关注。首先,在医疗方面,光纤激光器在激光手术和生物诊断方面显示出巨大的优势。激光提供了一种非接触的手术手段,光纤激光器输出的低能量超短脉冲能够快速消融肿瘤组织且对周围组织的损伤相对较小,减少了光化学副作用,是激光外科手术的 ideal 选择。此外,光纤激光脉冲通过与内窥镜结合,利用激光荧光光谱法可实时诊断人体内肿瘤组织,为癌症的早筛查早发现提供了有效手段。在工业方面,光纤激光器在精密打孔和材料加工方面应用非常广泛。激光加工过程中依靠光热效应,属于非接触加工。激光束能量可以聚焦到很小尺寸,而且速度快,因此其热影响区和变形很小,成本更低。在通信方面,光纤激光器因其可以实现更高速度的信号传输和更远距离的信号传递而广泛应用于通信领域。最重要的是,1.55 μm 波段的光纤激光器损耗很小,更易产生皮秒或飞秒量级的超短光脉冲,致使该波段的光纤激光器在光通信领域拥有不可替代的地位。

4 结论

本文搭建了紧凑的环形腔掺钕全光纤激光器,采用液相沉淀法制备CuO样品,利用光脉冲沉积技术将制备的样品沉积在锥形光纤腰部制成CuO-SA器件。将具有良好非线性吸收特性的CuO-SA器件与激光谐振腔耦合,成功在激光器中实现了稳定的传统孤子脉冲和束缚态孤子脉冲输出。当泵浦功率为233.6 MHz时,在中心波长1530.2 nm处获得了脉冲持续时间为1.23 ps的传统孤子脉冲序列,其3 dB带宽为3.4 nm,基本重复频率为5.34 MHz,对应脉冲间隔为184 ns,激光器最大输出功率为2.2 mW,脉冲能量为1.37 nJ。当泵浦功率达到329 mW时,在中心波长1529.6 nm处首次获得了稳定的束缚态孤子脉冲,其光谱调制周期为3 nm,基本重复频率为6.28 MHz,对应脉冲间隔为159 ns,脉冲宽度和脉冲分离度分别为1.09 ps和2.6 ps。CuO优异的光学特性又一次证明了过渡金属氧化物作为超短脉冲锁模器件材料的广阔发展前景。

参考文献:

- [1] RORIZ P, SILVA S, FRAZÃO O, et al. Optical fiber temperature sensors and their biomedical applications[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2020, 20(7): 2113.
- [2] LIU M L, LIU W J, LIU X M, et al. Application of transition metal dichalcogenides in mid-infrared fiber laser[J]. *Nano Select*, 2021, 2(1): 37-46.
- [3] WANG T, YU Q, GUO K, et al. Sb₂Te₃ topological insulator for 52 nm wideband tunable Yb-doped passively Q-switched fiber laser[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2021, 22(3): 287-295.
- [4] HONG Z J, WAN Y C, XI X M, et al. High-peak-power pump-modulated quasi-CW fiber laser[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(7): 1826-1833.
- [5] WANG J L, WANG X L, LEI J J, et al. Recent advances in mode-locked fiber lasers based on two-dimensional materials[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(8): 2315-2340.
- [6] WU X, WU Z C, HUANG T Y, et al. All-optical actively mode-locked fiber laser at 2- μ m based on interband modulation[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(5): 1-8.
- [7] LIU F, ZHANG Y, WU X D, et al. Lead sulfide saturable absorber based passively mode-locked Tm-doped fiber laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(2): 1-10.
- [8] KELLER U. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 831-838.
- [9] LI J, WANG C C, WANG P. Harmonic dissipative soliton resonance in an Er/Yb Co-doped fiber laser based on SESAM[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(17): 5958-5966.
- [10] GAO X B, ZHAO Z G, CONG Z H, et al. Stable 5-GHz fundamental repetition rate passively SESAM mode-locked Er-doped silica fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 9021-9029.
- [11] SHOHDA F, SHIRATO T, NAKAZAWA M, et al. A passively mode-locked femtosecond soliton fiber laser at 1.5 microm with a CNT-doped polycarbonate saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2008, 16(26): 21191-21198.
- [12] BAO Q L, ZHANG H, WANG Y, et al. Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers[J]. *Advanced Functional Materials*, 2009, 19(19): 3077-3083.
- [13] SOBON G, DUZYNSKA A, ŚWINIARSKI M, et al. CNT-based saturable absorbers with scalable modulation depth for Thulium-doped fiber lasers operating at 1.9 μ m[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 45491.
- [14] SOBON G, SOTOR J, PASTERNAK I, et al. Multilayer graphene-based saturable absorbers with scalable modulation depth for mode-locked Er- and Tm-doped fiber lasers[J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(12): 2884.
- [15] LIN Y H, YANG C Y, LIN S F, et al. Soliton compression of the erbium-doped fiber laser weakly started mode-locking by nanoscale p-type Bi₂Te₃ topological insulator particles[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, 11(5): 055107.
- [16] AHMED M H M, LATIFF A A, AROF H, et al. Femto-second mode-locked erbium-doped fiber laser based on MoS₂-PVA saturable absorber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 82: 145-149.
- [17] MA X, CHEN W, TONG L. Experimental demonstration of harmonic mode-locking in Sb₂Se₃-based thulium-doped fiber laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 143: 107286.
- [18] CHENG P K, AHMED S, QIAO J. Nonlinear optical properties of two-dimensional palladium ditelluride (PdTe₂) and its application as aerosol jet printed saturable absorbers for broadband ultrafast photonics[J]. *Applied Materials Today*, 2022, 26: 101296.
- [19] ISMAIL E I, KADIR N A, LATIFF A A, et al. Black phosphorus crystal as a saturable absorber for both a Q-switched and mode-locked erbium-doped fiber laser[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(76): 72692-72697.
- [20] ZHANG Y N, SONG Z Y, QIAO D, et al. 2D van der Waals materials for ultrafast pulsed fiber lasers: review and prospect[J]. *Nanotechnology*, 2021, 33(8): 082003.
- [21] WERNER J, GEISSBÜHLER J, DABIRIAN A, et al. Parasitic absorption reduction in metal oxide-based transparent electrodes: application in perovskite solar cells[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(27): 17260-17267.
- [22] LI J, SHU C, HU A, et al. Tuning oxygen non-stoichiometric surface via defect engineering to promote the catalysis activity of Co₃O₄ in Li-O₂ batteries[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 381: 122678.
- [23] WANG J J, LIU C J. Preparation of 2D WO₃ nanomaterials with enhanced catalytic activities: current status and perspective[J]. *Chembioeng Reviews*, 2015, 2(5): 335-350.
- [24] AHMAD H, AMIRI I S, ZULKIFLI A Z, et al. Stable dual-wavelength erbium-doped fiber laser using novel fabricated side-polished arc-shaped fiber with deposited

- ZnO nanoparticles[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(1): 11403-11407.
- [25] KASIK I, PODRAZKY O, MRAZEK J, et al. Erbium and Al_2O_3 nanocrystals-doped silica optical fibers[J]. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 2014, 62(4): 641-646.
- [26] RUSDI M F M, LATIFF A A, PAUL M C, et al. Titanium Dioxide (TiO_2) film as a new saturable absorber for generating mode-locked Thulium-Holmium doped all-fiber laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 89: 16-20.
- [27] AHMED M H M, YUSOFF N M, ABDULLAH C A C, et al. Nanosized titanium dioxide saturable absorber for soliton mode-locked thulium-doped fiber laser[J]. *Results in Physics*, 2021, 31: 104930.
- [28] ZHANG Q, ZHANG K, XU D, et al. CuO nanostructures: synthesis, characterization, growth mechanisms, fundamental properties, and applications[J]. *Progress in Materials Science*, 2014, 60: 208-337.
- [29] SADEQ S A, AL-HAYALI S K, HARUN S W, et al. Copper oxide nanomaterial saturable absorber as a new passive Q-switcher in erbium-doped fiber laser ring cavity configuration[J]. *Results in Physics*, 2018, 10: 264-269.
- [30] NADY A, AHMED M H M, LATIFF A A, et al. Femto-seconds soliton mode-locked erbium-doped fiber laser based on nickel oxide nanoparticle saturable absorber[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(10): 100602.
- [31] ALANI I M, LOKMAN M Q, AHMED M M, et al. A few-picosecond and high-peak-power passively mode-locked erbium-doped fibre laser based on zinc oxide polyvinyl alcohol film saturable absorber[J]. *Laser Physics*, 2018, 28(7): 075105.
- [32] SADEQ S A, HARUN S W, AL-JANABI A H. Ultrashort pulse generation with an erbium-doped fiber laser ring cavity based on a copper oxide saturable absorber[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(18): 5180-5185.
- [33] NADY A, BAHAROM M F, LATIFF A A, et al. Mode-locked erbium-doped fiber laser using vanadium oxide as saturable absorber[J]. *Chinese Physics Letters*, 2018, 35(4): 044204.
- [34] BAHAROM M F, RAHMAN M F A, LATIFF A A, et al. Lutetium (III) oxide film as passive mode locker device for erbium-doped fibre laser cavity[J]. *Optics Communications*, 2019, 446: 51-55.
- [35] KHALEEL W A, SADEQ S A, ALANI I A M, et al. Magnesium oxide (MgO) thin film as saturable absorber for passively mode locked erbium-doped fiber laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 115: 331-336.
- [36] AL-HITI A S, AL-MASOODI A H H, HARUN S W, et al. Tungsten trioxide (WO_3) film absorber for generating soliton mode-locked pulses in erbium laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 131: 106429.
- [37] LIU X M, YAO X K, CUI Y D. Real-time observation of the buildup of soliton molecules[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(2): 023905.