中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

单壁碳纳米管锁模的高稳定性全保偏少周期飞秒光纤激光器

王开 王一凡 张禄年 闫宇航 戴礼龙 黄千千 牟成博

Highly stable all-polarization-maintaining few-cycle femtosecond fiber laser mode-locked by single-walled carbon nanotubes

WANG Kai, WANG Yi-fan, ZHANG Lu-nian, YAN Yu-hang, DAI Li-long, HUANG Qian-qian, MOU Cheng-bo

引用本文:
王开, 王一凡, 张禄年, 闫宇航, 戴礼龙, 黄千千, 牟成博. 单壁碳纳米管锁模的高稳定性全保偏少周期飞秒光纤激光器[J]. 中国光学, 2026, 19(5): 1–9. doi: 10.3724/CO.2026–0089
WANG Kai, WANG Yi-fan, ZHANG Lu-nian, YAN Yu-hang, DAI Li-long, HUANG Qian-qian, MOU Cheng-bo. Highly stable all-polarization-maintaining few-cycle femtosecond fiber laser mode-locked by single-walled carbon nanotubes[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(5): 1-9. doi: 10.3724/CO.2026-0089

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3724/CO.2026–0089

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于半导体性单壁碳纳米管/富勒烯异质结的高性能透明全碳光电探测器

High–performance transparent all–carbon photodetectors based on the semiconducting single–walled carbon nanotube/fullerene heterojunctions

中国光学（中英文）. 2023, 16(5): 1243 https://doi.org/10.37188/CO.2022–0243

基于Nb_4AlC_3可饱和吸收体的超快掺铒光纤激光器

Ultrafast erbium–doped fiber laser modulated by Nb_4AlC_3 saturable absorber

中国光学（中英文）. 2025, 18(3): 510 https://doi.org/10.37188/CO.EN–2024–0032

基于宇称时间对称与饱和吸收效应的宽可调谐高光信噪比布里渊光纤激光器

Widely–wavelength–tunable brillouin fiber laser with improved optical signal–to–noise ratio based on parity–time symmetric and saturable absorption effect

中国光学（中英文）. 2024, 17(5): 1244 https://doi.org/10.37188/CO.EN–2024–0016

饱和吸收体恢复时间对正交偏振耗散孤子的影响

Influence of SA recovery time on orthogonally polarized dissipative solitons

中国光学（中英文）. 2024, 17(3): 714 https://doi.org/10.37188/CO.EN–2023–0032

同带泵浦的Tm:CYA调Q锁模激光器

Tm:CYA Q–switched mode–locked laser realized by tandem–pumping

中国光学（中英文）. 2024, 17(4): 764 https://doi.org/10.37188/CO.2023–0162

基于声光锁模全固态660 nm激光器

All–solid–state acousto–optic mode–locked laser operating at 660 nm

中国光学（中英文）. 2024, 17(1): 238 https://doi.org/10.37188/CO.EN–2023–0013

文章编号　2097-1842(2026)05-0001-09

单壁碳纳米管锁模的高稳定性全保偏少周期飞秒光纤激光器

王　开, 王一凡, 张禄年, 闫宇航, 戴礼龙, 黄千千, 牟成博*
（上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200444）

摘要: 为了满足面向阿秒科学、精密加工及超快光谱学等领域对高性能超短脉冲的需求, 本文研究了一种高稳定性、自启动的全保偏少周期飞秒光纤激光器。以单壁碳纳米管薄膜作为可饱和吸收体构建了重复频率为 100.45 MHz 的全保偏掺铒光纤种子源; 通过全保偏双向放大结构结合非线性光谱展宽与色散管理技术, 进一步经保偏高非线性光纤非线性展宽和色散补偿后, 基于自相关测得主脉冲宽度为 30.1 fs, 获得了仅含约 5.8 个光学周期的少周期脉冲序列, 其放大输出平均功率超过 200 mW。稳定性测试表明种子源连续运行 10 小时的功率均方根波动仅为 0.4%, 在引入温控与压电陶瓷进行重频锁定后, 百秒艾伦方差达 9.98×10^{-14}。该种子源凭借其紧凑的结构和优异的运行稳定性, 为后续产生跨倍频程超连续谱及实现高性能频率梳应用奠定了坚实的实验基础。

关　键　词: 碳纳米管饱和吸收体; 全保偏光纤激光器; 少周期脉冲; 非线性放大; 超连续谱
中图分类号: TP394.1;TH691.9　**文献标志码:** A　**doi:** 10.3724/CO.2026-0089　**CSTR:** 32171.14.CO.2026-0089

Highly stable all-polarization-maintaining few-cycle femtosecond fiber laser mode-locked by single-walled carbon nanotubes

WANG Kai, WANG Yi-fan, ZHANG Lu-nian, YAN Yu-hang, DAI Li-long, HUANG Qian-qian, MOU Cheng-bo*
(*School of Communication & Information Engineering*, *Shanghai University*, *Shanghai* 200444, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *mouc*1*@shu.edu.cn*

Abstract: To meet the stringent requirements of attosecond science, precision manufacturing, and ultrafast spectroscopy for high-performance ultrashort pulses, we report the development of a highly stable, self-starting all-polarization-maintaining few-cycle femtosecond fiber laser. An all-polarization-maintaining erbium-doped fiber seed source with repetition frequency of 100.45 MHz is constructed using a single-walled carbon

收稿日期: 2026-06-20; **修订日期:** 2026-07-16
基金项目: 国家自然科学基金(No. 62505168, No. 61975107); 上海市自然科学基金(No. 24ZR1422000); 国家资助博士后研究人员计划(No. GZC20250549); 天津大学精密测量技术与仪器国家重点实验室开放基金(No. Pila2505); 国家重点研发计划(No. 2020YFB1805800); “111”项目(No. D20031)
Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62505168, No. 61975107); Natural Science Foundation of Shanghai Municipality (No. 24ZR1422000); Postdoctoral Fellowship Program of CPSF (No. GZC20250549); Open Fund Project of State Key Laboratory Precision Measurement Technology and Instruments in Tianjin University (No. Pila2505); National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFB1805800); the “111” project (No. D20031)

nanotube film as a saturable absorber. By employing an all-polarization-maintaining bidirectional amplification scheme combined with nonlinear spectral broadening and dispersion management, the system achieves a pulse duration of 30.1 femtoseconds after nonlinear broadening in a polarization-maintaining highly nonlinear fiber and subsequent dispersion compensation. This corresponds to a few-cycle pulse train containing approximately 5.8 optical cycles, with an amplified average output power exceeding 200 milliwatts. Stability measurements demonstrate that the seed source maintains a power root-mean-square fluctuation of only 0.4 percent over 10 hours of continuous operation. Furthermore, after the implementation of temperature control and piezo-electric transducer stabilization for repetition rate locking, the Allan deviation reaches 9.98×10^{-14} over 100 seconds. With its compact architecture and exceptional operational stability, this seed source establishes a robust experimental foundation for the subsequent generation of octave-spanning supercontinuum and high-performance frequency comb applications.

Key words: single-walled carbon nanotube saturable absorber; all-polarization-maintaining fiber laser; few-cycle pulses; nonlinear amplification; supercontinuum generation

1 引 言

少周期 (few-cycle)、飞秒 (10^{-15} s) 甚至阿秒 (10^{-18} s) 脉冲，是现代超快科学的核心工具，用于在电子及晶格的本征时间尺度上实现对物质动态过程的实时观测与精准调控[1]。少周期飞秒激光器在时域维度上持续时间极短且峰值功率极高，因此在精密加工、强场物理和高分辨率光谱等研究领域有独特且不可替代的优势。相较于脉宽处于百飞秒至皮秒量级的传统激光器，少周期脉冲实现了能量在极短时域内的高度聚集，其时间分辨率已步入甚至超越亚周期(Sub-cycle)量级。高平均功率少周期激光的涌现，为驱动高次谐波产生及探究阿秒脉冲提供了核心动力，构成了阿秒物理及超快动力学研究的关键底层技术支撑[2]。少周期脉冲凭借其亚周期定时精度[3]、纳米级热影响区及极高瞬时场强[4]，在实现跨倍频程光谱[5]、透明材料 3D 直写[6-7] 以及极低损伤微创手术[8–9]等方面展现出显著优势，并结合百瓦级高功率技术突破了常规飞秒光源的性能瓶颈，成为阿秒科学与精密工程化应用的核心驱动力。当前，产生少周期飞秒脉冲的主流方法可概括为：锁模飞秒源结合非线性光谱展宽及色散补偿压缩。具体实现包括气体填充空芯光纤、光子波导芯片、全光纤非线性压缩等技术路线[10-13]。不同技术可在能量、重复频率、紧凑性和稳定性之间做出权衡。其中，全光纤结构被动锁模激光器通过非线性压缩方式实现少周期脉冲是其中一种结构简单、成本较低且稳定的方案。

单壁碳纳米管 (SWCNTs) 是一类准一维碳同素异形体材料，具有优异的电学及力学性能。此外，其由石墨烯片卷曲形成的管状结构以及半导体特性，也为其在光子学领域的应用提供了必要的条件。尤其是，SWCNTs 兼具优良的三阶非线性响应[14]、覆盖近红外至中红外波段的宽带吸收特性 (NIR–MIR)、亚皮秒量级的超快载流子复合时间 (<1 ps)[15]、成熟的制备工艺以及低成本等优势，使其在过去二十多年中，被广泛用作各类激光系统中的强度选择元件 (如可饱和吸收体)，并随着更大规模和更深入的系统研究，有望进一步发展成为具有商业化应用前景的功能光子器件。本文采用 SWCNTs 薄膜作为可饱和吸收体，采用被动锁模的方式，利用非线性光谱展宽及脉冲压缩，产生全保偏、自启动、主脉冲宽度为 30.1 fs 的稳定的接近少周期 (few-cycle) 的脉冲序列。与商用飞秒光纤激光器相比，本系统的实际特点在于采用全保偏结构、可自启动锁模、使用低成本可重复的 SWCNTs 薄膜。

2 激光器及放大器的搭建

2.1 单壁碳纳米管薄膜的制备与表征

本实验中，采用来自 HiPco 的 SWCNTs (纯度 >85%, Nanointegris) 作为本工作的原始材料。所选 SWCNTs 的管径主要分布在 0.8 ~ 1.2 nm，对应 1 300 ~ 1 600 nm 的吸收峰，是目前在 C 波段

应用中最为适合和成熟的商业化 SWCNTs 样品，并可最大程度减小非共振 SWCNTs 所引入的非可饱和损耗及其对调制深度的影响。将数毫克 SWCNTs 粉末分散于去离子水 (DI water) 中，并加入十二烷基苯磺酸钠 (SDBS, Sigma-Aldrich) 作为分散剂。随后利用超声仪 (Qsonica Q125) 进行处理，以获得均匀且稳定的 SWCNTs 分散液。所得分散液上清液进一步通过无粘结剂玻璃纤维滤膜 (Whatman, 颗粒截留尺寸为 0.7 μm) 进行真空过滤，以去除杂质及较大的 SWCNTs 束。最后将分散液与 PVA 聚合物混合，完成 SWCNTs 聚合物薄膜的制作。SWCNTs 聚合物薄膜图像及其典型光学表征结果如图 1(彩图见期刊电子版)所示。其图像如图 1(a) 所示，显微镜下如图 1(b) 所示。图 1(d) 为 SWCNTs 聚合物薄膜的线性光学吸收谱，可以看到在 1 100 ~ 1 600 nm 处存在显著吸收峰，其覆盖了保偏掺铒光纤的增益带宽，并与 *E*11 光学跃迁相对应[16]。600 ~ 900 nm 区域吸收峰对应半导体型 SWCNTs 的 *E*22 跃迁模型，而 550 nm 以下的吸收峰则与金属性 SWCNTs 的能带跃迁相关。图 1(e) 给出在 532 nm 激光激发 (HARBIA, HR Evolution) 下测得 SWCNTs 聚合物薄膜的拉曼光谱。在 1 500 ~ 1 600 cm^{-1} 范围内出现的显著峰被称为石墨 (G) 模，对应六方 sp^2 共价键晶格中简并双声子模。在 SWCNTs 中，G 模通常分裂为两个不对称特征峰：G^+和 G^-，分别与相邻碳原子的环向 (TO) 和轴向 (LO) 振动相关。由于六方 sp^2 晶格对称性被打破，在约 1 350 cm^{-1} 处出现的峰被称为无序 (D) 模。D 模与 G 模的峰强之比用于定量表征 SWCNTs 薄膜中的缺陷程度。本工作制备薄膜的该比值约为 0.1，表明制备的 SWCNTs 聚合物薄膜中仅存在少量缺陷。

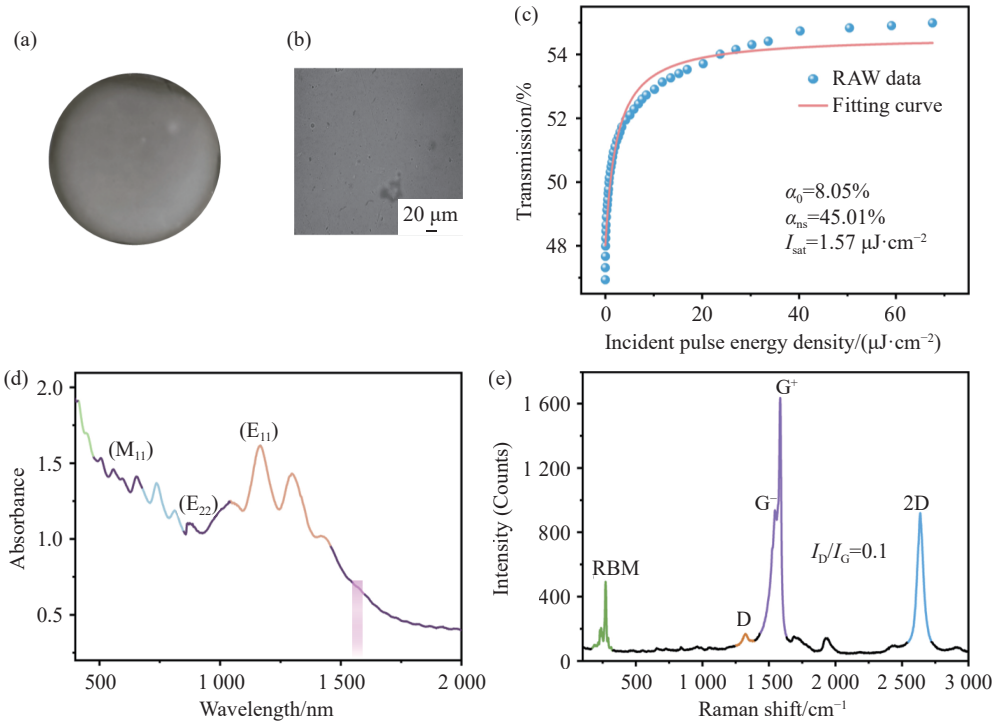

图 1　SWCNTs 聚合物薄膜的典型光学特性表征。(a) SWCNTs 聚合物薄膜纯视觉图像；(b) 显微镜下 SWCNTs 聚合物薄膜图像；(c) SWCNTs 聚合物薄膜非线性光学吸收特性；(d) SWCNTs 聚合物薄膜的线性光学吸收谱；(e) SWCNTs 聚合物薄膜拉曼光谱

Fig. 1　Typical optical property characterization of SWCNTs polymer films. (a) Image of SWCNTs film from camera; (b) image of SWCNTs film under microscope; (c) nonlinear optical absorption characteristics of SWCNTs film; (d) linear optical absorption spectrum of SWCNTs film; (e) raman spectrum of SWCNTs film

为表征 SWCNTs 薄膜的非线性光学响应，搭建了双通道调制深度与非饱和损耗测量系统。光源采用自制的超快光纤激光器，中心波长为 1 580 nm，脉冲宽度为 190 fs。SWCNTs 聚合物薄膜的非线性光学吸收特性如图 1(c) 所示，随着入射脉冲能量面密度由 0.01 μJ/cm^2 提高至 65 μJ/cm^2，SWCNTs 薄膜的透射率逐渐进入饱和状态。其功率依赖透射行为可用式 (1) 拟合：

$$T(I) = 1 - \Delta T \times \exp(-I/I_{sat}) - T_{ns} \quad , \qquad (1)$$

其中，$T(I)$为功率依赖透射率，I为入射脉冲强度，ΔT为调制深度，I_{sat}为饱和强度，T_{ns}为非饱和损耗。从图 1 可知，SWCNTs 聚合物薄膜非线性透射拟合调制深度为 8.05%，非饱和损耗为 45.01%，饱和强度为 1.57 μJ/cm^2。后续可通过优化 SWCNT 浓度、薄膜厚度和转移工艺进一步降低非饱和损耗且保证样品的参数维持稳定并系统评估样品间重复性。

2.2 全保偏种子源及光纤放大器设计

图 2(a)(彩图见期刊电子版)展示了采用 SWCNTs 聚合物薄膜的全保偏光纤被动锁模激光器种子源及放大器实验结构示意图。采用一体化器件实现短腔设计，将 20% 的输出耦合器、偏振无关的隔离器和波分复用器集成于一体 (TIWDM)，其器件的插入损耗约为 1.16 dB。增益介质为保偏高增益掺铒光纤 (EDF, Liekki, PM-Er80-4/125)，在波长为 1 550 nm 处群速度色散 (GVD)+22.47 ps^2·km^{-1}，其余光纤均为保偏的单模光纤 (PM-SMF)，其 GVD 在 1 550 nm 处为−23.27 ps^2·km^{-1}。SWCNTs 聚合物薄膜放置于光纤法兰中并用光纤跳线夹持，作为可饱和吸收体 (SA) 形成环形腔。利用光谱分析仪 (OSA, Yokogawa AQ6370D) 测量从 TIWDM 输出的 20% 光信号，其最高光谱分辨率为 0.02 nm。此外，信号经高速光电探测器 (Newport 818-BB-51F) 将脉冲光信号转换为电信号，并通过实时示波器 (OSC, DSOS404A) 和射频频谱分析仪 (Agilent N9020A) 进行探测。此外，输出的脉冲序列半高全宽 (FWHM) 由二次谐波型自相关仪 (FEMTOCHROME Research, FR-103XL) 测量。

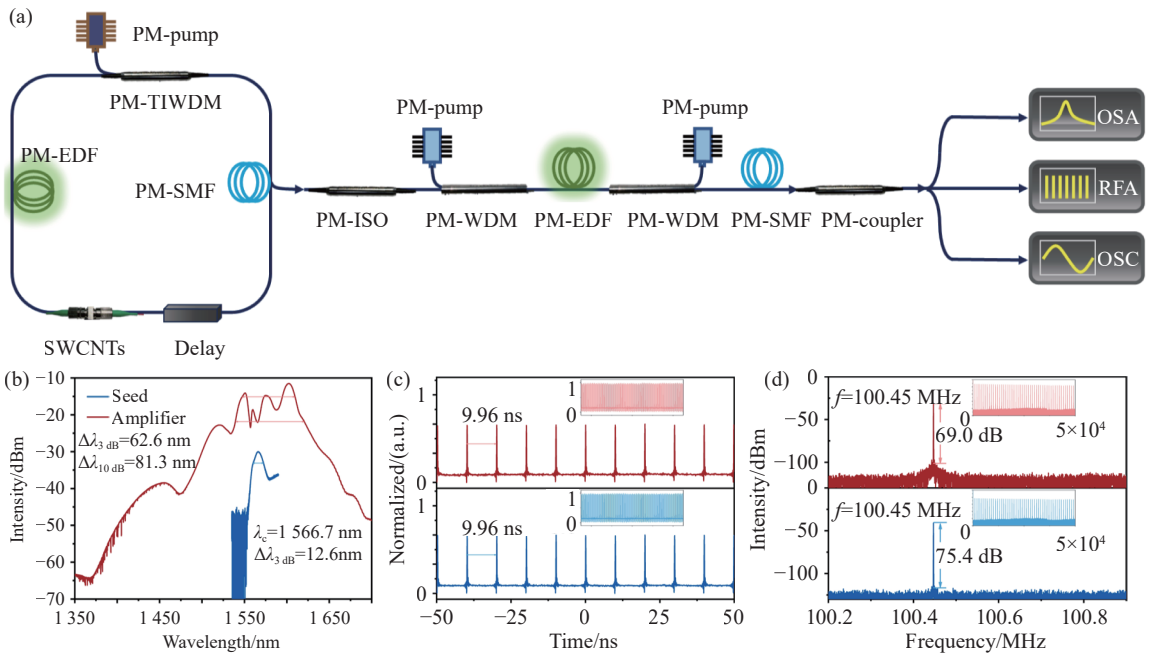

图 2 全保偏 SWCNTs 光纤飞秒激光器原理示意图及测量结果。(a) 种子源及放大器结构原理图；(b) 输出光谱图，蓝色：种子输出光谱，红色：放大器输出光谱；(c) 时域脉冲序列输出图，蓝色：种子脉冲序列，红色：放大器脉冲序列，插图：50 μs 范围的脉冲序列图；(d) 0.8 MHz 带宽、100 Hz 分辨率的基频射频谱图，蓝色：种子射频，红色：放大器射频，插图：扫描范围为 5.0 GHz、10 kHz 分辨率带宽的射频谱

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of the all-PM SWCNTs fiber femtosecond laser and measurement results. (a) Schematic diagram of the seed source and amplifier structure; (b) output spectrum diagram, blue: seed output spectrum, red: amplifier output spectrum; (c) time-domain pulse sequence output diagram, blue: seed pulse sequence, red: amplifier pulse sequence, inset: pulse sequence diagram within a 50 μs range; (d) fundamental radio frequency spectrum diagram with a bandwidth of 0.8 MHz and a resolution of 100 Hz, blue: seed radio frequency, red: amplifier radio frequency, inset: radio frequency spectrum with a scanning range of 5.0 GHz and a resolution bandwidth of 10 kHz

激光器种子源部分由 98.5 cm PM-EDF 增益光纤和 107.8 cm PM-SMF 光纤组成，总腔长为 206.0 cm。腔体净色散为−0.002 952 ps^2，表明其工作于展宽区域。当 SWCNTs 聚合物薄膜插入腔

内并逐渐提高泵浦功率时, 激光在 1560 nm 处首先出现连续波 (CW), 随后继续提高泵浦功率, 在无需任何偏振控制的情况下转变为稳定锁模状态, 实现自启动。放大器部分采用全保偏双向泵的放大结构, 提供足够的能量, 以确保非线性光谱展宽以及脉宽压缩达到最佳状态。

图 2(b)(彩图见期刊电子版)给出了 SWCNTs 聚合物薄膜对应的典型锁模展宽脉冲光谱 (蓝线) 及放大后光谱形状 (红线), 放大后的光谱 10 dB 带宽能够达到 81.3 nm。图 2(c)(彩图见期刊电子版)分别显示了种子源 (蓝线) 和放大后 (红线) 的 50 ns 内的脉冲序列, 脉冲间隔均为 9.96 ns, 两个插图给出了 50 μs 时间范围内的脉冲包络, 其相对平滑的抖动幅度表明种子源与放大器都能够保持良好的稳定性。图 2(d)(彩图见期刊电子版)分别显示了种子源 (蓝线) 和放大后 (红线) 脉冲的傅立叶变换射频信号, 观测到室温情况下基频重复率为 100.45 MHz、信噪比 (SNR) 为种子源 75.4 dB, 放大后 SNR 为 69.0 dB。两幅插图展示了在 5 GHz 扫描范围内的频谱成分, 较为平坦的幅度起伏表明放大前后的脉冲都具有良好的稳定性。种子源的平均输出功率为 1.97 mW, 经过双向放大后, 其平均输出功率能够稳定在 200 mW 以上。该输出水平表明该系统在紧凑型全保偏飞秒光纤光源方面具有一定应用潜力。

2.3　光谱展宽及脉宽压缩

为有效实现脉冲压缩, 本工作采用非线性光谱展宽与色散管理技术对脉冲进行整形。首先利用保偏的单模光纤在时域上将初始脉冲进行一定的展宽; 随后在增益介质中对展宽后的脉冲进行放大; 最后, 利用色散补偿的方式将放大后的脉冲重新压缩至接近理想的脉宽, 以获取极高峰值功率的超短脉冲。本实验中, SWCNTs 激光器种子源输出的脉冲序列, 经过被双向放大器注入能量的 1 m 长的 PM-EDF 增益光纤后输出, 与振荡器直接输出的脉冲光谱相比, 由于光纤放大器引入的非线性效应, 光谱被展宽, 在色散管理工程后, 脉宽被压缩。脉冲序列自相关结果如图 3 (彩图见期刊电子版) 所示。在双泵浦输出电流分别达到 700 mA 和 750 mA 时, 此时光谱 3 dB 带宽达到了 62.6 nm。通过优化种子源及放大器后 PM-SMF 的长度来补偿由正常色散的增益光纤引入的啁啾, 最终种子源的脉冲 FWHM 可以由 369.2 fs (图 3(a)) 压缩至如图 3(b) 所示的放大器输出的 42.1 fs。经过计算, 其时间带宽积(Time-Bandwidth Product, TBP)为 0.332, 接近双曲正割脉冲的变换极限值 0.315, 表明放大后脉冲已被较好压缩。此时, 单脉冲能量可以达到 2.0 nJ, 脉冲峰值功率可达 47.4 kW。此时, 该脉冲大约包含 8 个光学周期, 接近于少周期脉冲。

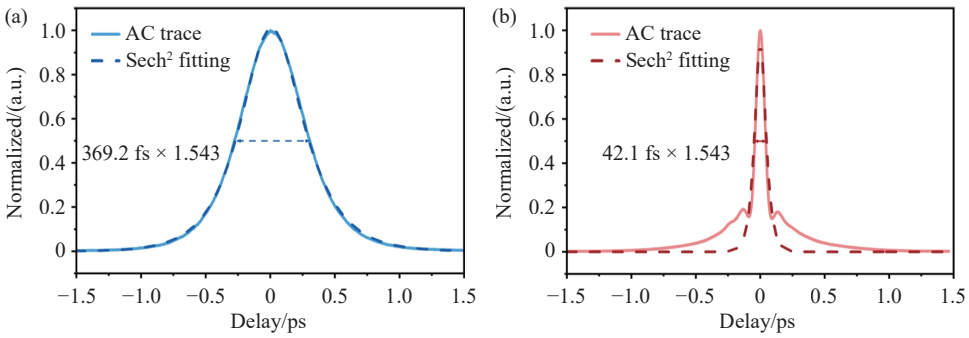

图 3　脉冲序列自相关结果。(a) 种子脉冲序列自相关结果; (b) 放大输出脉冲序列自相关结果

Fig. 3　Autocorrelation results of pulse sequences. (a) Autocorrelation results of seed pulse sequence; (b) autocorrelation results of amplified output pulse sequence

3　少周期脉冲的产生

为了得到脉冲周期更少的脉冲序列, 采用高非线性光纤进行进一步的光谱展宽、脉冲压缩, 得到超连续光谱 (Supercontinuum) 以及少周期脉冲。通过非线性脉冲放大的方式得到具有高峰值功率的脉冲, 用其泵浦一段长度为 25 cm 的 PM-HNLF (Thorlabs PMHN5), 色散系数为(+5 ± 1) ps/(nm·km), 高非线性系数为 10.7 $W^{-1}\cdot km^{-1}$, 色散斜率为 0.025 ps/(nm^2·km), 见图 4(彩图见期刊电子版)。其结构如图 4(a) 所示。由于激发自相位调制 (SPM)、交叉相位调制 (XPM)、四波混频

(FWM)、受激拉曼散射 (SRS) 等多种非线性效应，可将其拓宽超过一个倍频程。图 4(c) 中测量得到的超连续光谱均为两台光谱仪 OSA AQ6370D 和 OSA AQ6375 高于光谱仪噪声底的有效测量范围，测量位置位于 PM-HNLF 后经过 10 cm PM-SMF 光纤处。以光谱峰值为参考，超连续谱的−20 dB 带宽为 1 000 nm~2 100 nm，−30 dB 带宽为 980 nm~2 400 nm。此外，输出的脉冲序列 FWHM 能够被压缩至 30.1 fs，如图 4(b) 所示，根据中心波长 1 560 nm 进行计算，其脉冲序列仅包含 5.8 个周期，经 PM-HNLF 后，超连续输出端平均功率为 65.1 mW，进一步的脉宽压缩使其变成了峰值功率极高、脉冲极短的少周期脉冲序列输出。需要指出的是，图 4(c) 所示 1 000~2 400 nm 光谱为 PM-HNLF 后测得的超连续谱有效测量范围，30.1 fs 脉宽来自 PM-HNLF 输出后经色散补偿得到的主脉冲自相关测量结果。

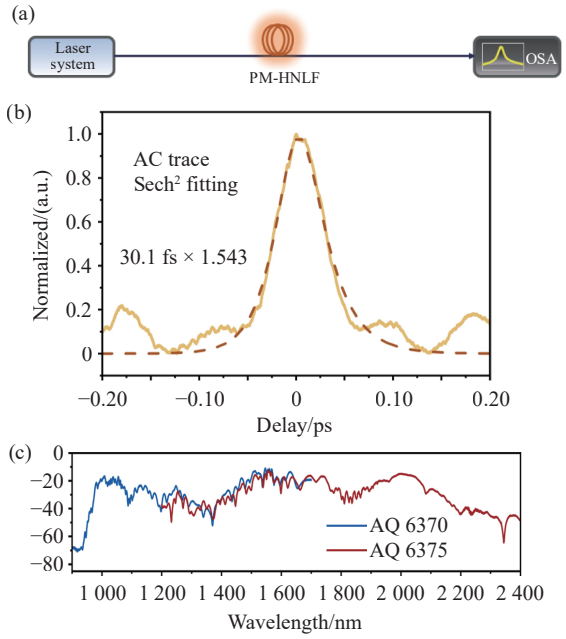

图 4 超连续谱的产生示意图及输出结果。(a) 超连续产生结构示意图；(b) 超连续脉冲序列自相关结果；(c) 超连续光谱输出结果 (分别采用 OSA AQ 6370D (600 ~ 1 700 nm) 以及 OSA AQ 6 375 (1 200 ~ 2 400 nm) 进行光谱采集)

Fig. 4 Schematic diagram of supercontinuum generation and output results. (a) Schematic diagram of supercontinuum generation structure using HNLF; (b) autocorrelation results of supercontinuum pulse sequence; (c) output results of supercontinuum sp ectrum (Spectra were collected using the OSA AQ 6370D (600-1 700 nm) and OSA AQ 6 375 (1 200-2 400 nm))

4 稳定性测试及重频锁定

为验证自由运转情况下重复频率 (f_{rep}) 为 100.45 MHz 的 SWCNTs 聚合物薄膜作为 SA 的锁模光纤激光器的工作稳定性，在无任何反馈控制时，对其输出光谱和输出功率连续监测了超过 10 小时，结果如图 5(彩图见期刊电子版)所示。图 5(a) 给出了 10 小时内的锁模光谱演化结果，未观察到明显的中心波长漂移、谱线抖动以及 CW 成分的出现。系统环境敏感性主要来源于温度导致的腔长和有效折射率变化、机械振动导致的光纤应力变化以及泵浦功率波动导致的增益变化。图 5(b) 显示了 10 小时内，种子源输出功率均方根 (RMS) 波动约为 0.41%。此外，放大器 10 小时内波动 0.4 mW，RMS 达到 0.22%。上述结果有力地证明了本文所提出的高重复频率短腔被动锁模光纤激光器具有优异的运行稳定性。

此外，锁模光纤激光器内部和外部环境，例如温度、振动等均存在大量噪声，从而导致频率发生抖动和漂移。其中，温度对于谐振腔腔长的主要干扰来自于光纤受到温度影响后的热胀冷缩现象，尽管构成光纤的二氧化硅的热膨胀系数很小，通常在 0.55×10^{-6} 量级，而构成光纤涂覆层的聚合物的热膨胀系数通常比二氧化硅高出两个数量级，因此涂覆层的膨胀会拉伸光纤，引起光纤长度的变化。而温度变化除了对光纤的纵向长度有影响，对模式有效折射率也会产生较大的影响。这个影响主要包括光纤的横向热膨胀会改变纤芯半径，从而改变模式的有效折射率。光纤随温度改变出现的横向、纵向的变化就会导致锁模激光器频率发生剧烈波动。为了更好地对其进行反馈控制，利用温控系统和压电陶瓷 (PZT) 元件的压电效应对光纤长度进行控制，从而对振荡器的 f_{rep} 信号进行负反馈控制。如图 6(a) 所示，在锁定重复频率后，锁模激光器的重复频率稳定在 100.004 9 MHz，其频率抖动幅度在 60 min 内小于 700 μHz，其一秒内的不稳定度 (用艾伦方差 (Allan Deviation) 表示) 可以达到 1.81×10^{-12}，而百秒内的艾伦方差下降至 9.98×10^{-14}，如图 6(b) 所示。该数据说明了 f_{rep} 信号良好的锁定效果。

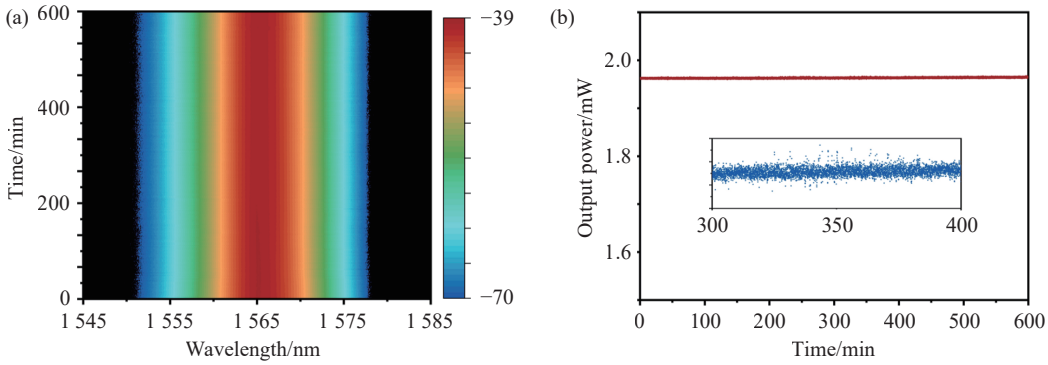

图 5　锁模光纤激光器的输出稳定性测试结果。(a) 10 小时内的光谱演变结果; (b) 10 小时内的输出功率演变, 插图: 300 ~ 400 min 内功率演化图局部放大

Fig. 5　Output stability test results of a mode-locked fiber laser. (a) Evolution of spectrum over 10 hours; (b) evolution of output power over 10 hours. Inset: magnification of power evolution diagram within 300-400 minutes

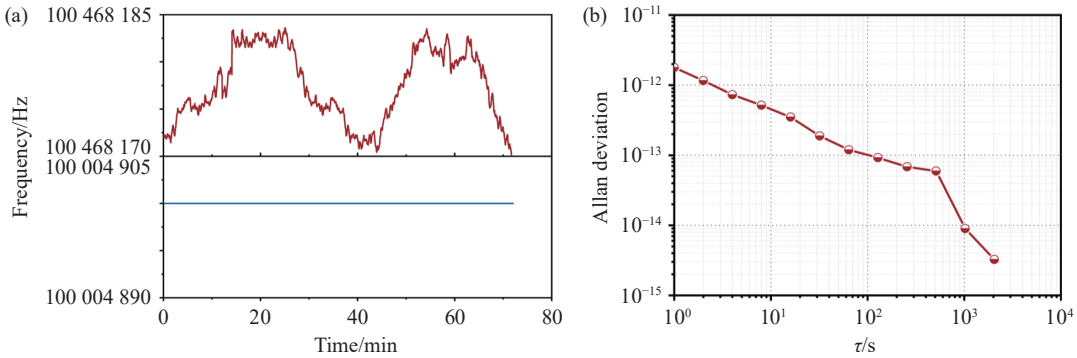

图 6　锁模光纤激光器锁频后稳定性测试结果。(a) 60 分钟内的激光器频率演变,上图: 未锁定, 下图: 锁定; (b) 锁频后的 f_{rep} 艾伦方差结果

Fig. 6　Stability test results of mode-locked fiber laser after repetition rate locking. (a) Laser repetition rate evolution within 60 minutes, Top image: unlocked, bottom image: locked; (b) Allan deviation result of the f_{rep}.

本工作在系统架构与精密测控方面也展现出部分优势。综合同类研究来看, 如表 1 所示: 部分工作虽在单一指标(如极窄脉冲或高功率)上表现突出, 但往往缺乏频率锁定能力或环境鲁棒性; 而另一些追求全指标锁定的系统, 则常因腔内复杂度高而导致脉冲宽度受限。相比之下, 本工作通过协同优化全保偏结构、碳纳米管锁模与腔内色散, 在维持高环境稳定性和重复频率锁定的同时, 兼顾了少周期脉冲输出与适宜的功率及重频。这种多维度的优势平衡, 为实现实用化、高鲁棒性的少周期超快光源开辟了新途径。

表 1　相似工作的参数整理与对比

Tab. 1　comparison of similar working parameters

参考文献	工作波段	脉冲宽度	平均功率	重复频率	f_{rep}/f_{ceo} 是否锁定
[17]	1 550 nm	29 fs	52 mW	4 MHz	否/否
[18]	1 550 nm	22.7 fs	120 mW	43 MHz	否/否

续表 1

参考文献	工作波段	脉冲宽度	平均功率	重复频率	f_{rep}/f_{ceo} 是否锁定
[19]	1 550 nm	34 fs	320 mW	200 MHz	否/否
[20]	1 550 nm	50 fs	13.6 mW	85 MHz	否/否
[21]	1 566 nm	77 fs	37 mW	199.6 MHz	否/否
[22]	1 565 nm	72 fs	3 mW	250 MHz	否/否
[23]	1 550 nm	100 fs	50 mW	83 MHz	是/是
[24]	1 550 nm	44.5 fs	440 mW	206 MHz	是/是
本文	1 560 nm	30.1 fs	65.1 mW	100.45 MHz	是/否

5　结　论

本文搭建了一套可自启动的全保偏光纤 SWCNTs 聚合物薄膜的激光器, 自由运转重复频率为 100.45 MHz, 种子源 FWHM 为 369.2 fs, 经过

双向放大器后，FWHM 被压缩至 42.1 fs，输出平均功率超过 200 mW，脉冲峰值功率 47.4 kW，并验证其种子源的长时间稳定工作的能力。此外，通过负反馈的方式，使其重复频率锁定，当前系统在载波包络锁定 (f_{ceo}) 和工程化封装方面仍有待进一步完善。进一步经过 HNLF 光纤非线性展宽后，脉冲被压缩至 30.1 fs，仅包含约 5.8 个光学周期，使其成为少周期脉冲序列，后续为获得精确脉宽参数，将开展 FROG/SPIDER 相位恢复测量。与其他工作相比，本工作并非单一指标的极限突破，而是在全保偏光纤结构、碳纳米管锁模、高稳定运行和少周期脉冲输出之间取得较好的综合平衡。未来，少周期脉冲研究将聚焦于载波包络相位的精密锁定与中红外长波段的拓展，旨在实现亚周期量级的电子动力学超快调控。与此同时，超连续谱研究将致力于提升空间相干性，并推动其与氮化硅等光子芯片的集成化进程，从而构建更紧凑、跨倍频程的频率梳光源。通过在脉冲压缩、新型增益介质及放大技术上的持续突破，该领域将打通从实验室研究到工程化应用的路径，为极端非线性光学、阿秒物理及精密测量提供更高性能的理论与工具支撑。

参考文献：

[1] TIAN K, HE L ZH, YANG X M, *et al*.. Mid-infrared few-cycle pulse generation and amplification[J]. *Photonics*, 2021, 8(8): 290.

[2] CARLSON D R, HICKSTEIN D D, ZHANG W, *et al*.. Ultrafast electro-optic light with subcycle control[J]. *Science*, 2018, 361(6409): 1358-1363.

[3] VIOTTI A L, LI CH, ARISHOLM G, *et al*.. Few-cycle pulse generation by double-stage hybrid multi-pass multi-plate nonlinear pulse compression[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(4): 984-987.

[4] WANG SH T, YANG J J, DENG G L, *et al*.. Femtosecond laser direct writing of flexible electronic devices: a mini review[J]. *Materials*, 2024, 17(3): 557.

[5] HÄDRICH S, KIENEL M, MÜLLER M, *et al*.. Energetic sub-2-cycle laser with 216 W average power[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(18): 4332-4335.

[6] LI C L, FISHER C J, BURKE R, *et al*.. Orthopedics-related applications of ultrafast laser and its recent advances[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(8): 3957.

[7] ROTHHARDT J, HÄDRICH S, DELAGNES J C, *et al*.. High average power near-infrared few-cycle lasers (Laser Photonics Rev. 11(4)/2017)[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(4): 1770041.

[8] FU W, WRIGHT L G, SIDORENKO P, *et al*.. Several new directions for ultrafast fiber lasers [invited][J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9432-9463.

[9] NIU S B, WANG W W, LIU P, *et al*.. Recent advances in applications of ultrafast lasers[J]. *Photonics*, 2024, 11(9): 857.

[10] PI Z, KIM H Y, GOULIELMAKIS E. Petahertz-scale spectral broadening and few-cycle compression of Yb: KGW laser pulses in a pressurized, gas-filled hollow-core fiber[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(22): 5865-5868.

[11] QIAN J Y, WANG P F, PENG Y J, *et al*.. Pulse combination and compression in hollow-core fiber for few-cycle intense mid-infrared laser generation[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(4): 477-483.

[12] YUAN ZH, YANG K J, LI Y, *et al*.. Generation of high-repetition-rate, high-power, few-cycle, 2-μm laser pulses with a single-stage all-fiber nonlinear compressor[J]. *Optics Letters*, 2025, 50(12): 3852-3855.

[13] WU Y, CAI Y, ZHOU G Q, *et al*.. Generation of sub-three-cycle pulses via double-stage all-fiber nonlinear compression from a thulium-doped fiber laser[J]. *Advanced Photonics Nexus*, 2025, 4(5): 056009.

[14] CHEN Y C, RARAVIKAR N R, SCHADLER L S, *et al*.. Ultrafast optical switching properties of single-wall carbon nanotube polymer composites at 1.55 μm[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 81(6): 975-977.

[15] OSTOJIC G N, ZARIC S, KONO J, *et al*.. Interband recombination dynamics in resonantly excited single-walled carbon nanotubes[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(11): 117402.

[16] WEISMAN R B, BACHILO S M. Dependence of optical transition energies on structure for single-walled carbon nanotubes in aqueous suspension: an empirical Kataura plot[J]. *Nano Letters*, 2003, 3(9): 1235-1238.

[17] PURDIE D G, POPA D, WITTWER V J, *et al*.. Few-cycle pulses from a graphene mode-locked all-fiber laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(25): 253101.

[18] LUO H, ZHAN L, ZHANG L, *et al*.. Generation of 22.7-fs 2.8-nJ pulses from an erbium-doped all-fiber laser via single-stage soliton compression[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(17): 3780-3784.

[19] YU J, FENG Y, CAI Y J, *et al*.. 34-fs, all-fiber all-polarization-maintaining single-mode pulse nonlinear amplifier[J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16630-16637.

[20] ZHOU J Q, PAN W W, FU X H, *et al*.. Environmentally-stable 50-fs pulse generation directly from an Er: fiber oscillator[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 52: 101963.

[21] HAN Y, TIAN H CH, MENG F, *et al*.. Environment-stable sub-100 fs Er: fiber laser with a 3 dB bandwidth of 78 nm[J]. *Optics Express*, 2022, 30(26): 48021-48029.

[22] HÄNSEL W, HOOGLAND H, GIUNTA M, *et al*.. All polarization-maintaining fiber laser architecture for robust femtosecond pulse generation[J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(1): 41.

[23] KUSE N, JIANG J, LEE C C, *et al*.. All polarization-maintaining Er fiber-based optical frequency combs with nonlinear amplifying loop mirror[J]. *Optics Express*, 2016, 24(3): 3095-3102.

[24] KITAJIMA S, JUNG K, NISHIZAWA N. 206 MHz fully stabilized all-PM dispersion-managed figure-9 fiber laser comb[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 7108.

作者简介：

牟成博，男(1982—)，黑龙江大庆人，博士，天津大学精密仪器与光电子工程学院获得工学学士学位，英国圣安德鲁斯大学物理与天文学院获得理学硕士学位，英国阿斯顿大学光子技术研究所获得光子学博士学位，2016 年至今，在上海大学通信与信息工程学院担任教授、博士生导师。主要从事全光纤超快激光器的实现及脉冲动力学研究，光纤器件和激光偏振特性研究、新型光纤器件的传感及光纤激光应用、纳米光子学等。 E-mail: mouc1@shu.edu.cn