

NALM 全保偏光纤激光器非对称耦合比

对激光性能影响研究*

陈震¹⁾ 杨直²⁾ 李泽¹⁾ 吕志国^{1†)}

1) (内蒙古大学物理科学与技术学院, 呼和浩特 010021)

2) (浙江省激光智能装备技术创新研究中心, 温州 325200)

摘要

1 μm 波段激光器是当前应用最为广泛的一类激光光源。然而, 传统该波段激光器普遍存在稳定性差、噪声水平高等问题, 探索该波段激光性能参数的影响机制、开发满足实际应用需求的低噪声、高稳定性种子源已成为该领域的迫切需求。本文设计了一种基于非线性放大环形镜 (NALM) 的全保偏色散管理掺镱光纤激光器。腔内采用可调谐光栅对实现色散动态调控, 系统研究了 50:50、40:60 和 30:70 三种耦合比对锁模特性的影响规律。实验结果表明: 当腔内色散处于近零色散区时, 相较于 50:50 与 40:60 两种耦合比配置, 30:70 耦合比条件下激光器的自启动泵浦阈值最低, 仅需 210 mW 即可实现自启动锁模; 进一步优化色散并将泵浦功率降至 64 mW, 可获得中心波长为 1030 nm 的稳定锁模脉冲, 重复频率 34.782 MHz, 脉冲宽度 1.908 ps, 信噪比 (SNR) 高达 81 dB, 平均输出功率为 1.62 mW。此外, 随着非对称耦合比的增大, 腔内非线性效应得到有效抑制, 光谱逐渐趋于平滑。本研究揭示了高耦合比可优化腔内功率循环效率与非线性效应之间的动态平衡, 从而有效降低 NALM 锁模机制的阈值并提升脉冲稳定性。该激光器作为一种低阈值、高稳定性的种子源, 在太赫兹产生、光学频率梳及超快光谱学等领域具有广阔的应用前景。

关键词: 非线性放大环形镜; 低阈值; 高稳定性; 耦合比

PACS: 42.55.-f, 42.55. Wd, 42.60.-v, 42.65.-k

基金: 内蒙古自治区自然科学基金 (批准号: 2025MS01009)、国家自然科学基金 (批准号: 12164030)、浙江省重点研发项目千瓦级脉宽可调光纤激光关键技术 (批准号: 2024SJZX0039)

† 通信作者. E-mail: lvzhiguo@imu.edu.cn

第一作者. E-mail: 17531079752@163.com

1 引言

被动锁模光纤激光器因结构灵活紧凑、光束质量好及成本低等诸多优势，已被广泛应用于精密微纳加工、高精度测距、生物医学及基础物理学研究等多个领域^[1-4]。其中，掺镱光纤激光器因具有高效率和低量子损耗的特点，在 $1\ \mu\text{m}$ 波段的超短脉冲生成方面得到了深入研究^[5,6]，其实现路径主要依赖于对传输光施加强度依赖性损耗的可饱和吸收体，包括基于材料本征非线性吸收的天然可饱和吸收体和基于光纤非线性克尔效应的等效可饱和吸收体两大类。具体而言，天然可饱和吸收体主要由半导体可饱和吸收镜（SESAM）、碳纳米管（CNT）、石墨烯及过渡金属硫族化合物构成^[7-11]。然而，这类天然可饱和吸收体具有低损伤阈值、更慢的弛豫时间以及更高的长期退化风险；同时，其弛豫过程缓慢所引入的固有效应会导致噪声底限过高，对于精密应用极为不利^[12,13]。相反，对于等效可饱和吸收体，例如非线性偏振旋转（NPR）、非线性多模干涉（NL-MMI）、Mamyshev（MO）和非线性放大环形镜（NALM）等机制^[14-18]，则表现出高损伤阈值、超快恢复时间等优势。另一方面，随着超快激光应用对系统稳定性要求的不断提高，传统非保偏结构（如 NPR、NL-MMI 及 MO）中任何器件偏振态的变化均会显著影响激光器的稳定性。相比之下，基于 NALM 机制的九字型光纤激光器通过引入非互易相移器不仅显著提升了自启动性能，同时与全保偏结构的深度适配使其具有优异的环境鲁棒性^[19]，成为极具吸引力的替代方案。

近年来，为进一步提升基于 NALM 机制的九字型光纤激光器的锁模性能，已在各方面提出并探索了多种优化方案。例如，针对九字腔因自启动机制导致的脉冲能量受限问题，Duan 等人通过研究腔内线性相位偏移，在维持自启动单脉冲锁模的同时提升了输出能量，从而在原理上解决了这一瓶颈^[20]。Deng 等人基于实验与数值模拟，揭示了增益光纤在 NALM 中的不对称性对脉冲能量的调控

机制，并通过优化增益位置，实现了 22 nJ 脉冲能量、191 mW 平均功率及 195 fs 压缩脉宽的输出^[21]。随后，为降低锁模阈值，Yang 等人首次在基于 NALM 机制的九字型掺铒光纤激光器中观察到注入 1580 nm 光脉冲诱导的 Q 开关锁模过渡态，并通过进一步优化功率及腔内色散，发现注入光可将自启动锁模阈值从 355 mW 降至 171 mW，为低阈值高稳定性锁模激光器提供了新思路^[22]。Chen 等人利用石墨烯修饰微光纤器件的热非线性特性动态调控九字型掺铒光纤激光器中的相位差，从而通过调节激光功率在 300-390 mW 的泵浦功率范围内灵活调节自启动锁模阈值，实现信噪比高达 70 dB 的脉冲输出^[23]。不同于上述外部调控手段，Xiong 等人与 Li 等人分别在 1550 nm 和 915 nm 波段的 NALM 九字型光纤激光器中，通过调控耦合分光比优化腔内非线性相位差以改善锁模性能，从而在不同波段验证了耦合比调控对降低锁模阈值与提升激光稳定性的有效性^[24,25]。尽管基于 NALM 机制的九字型光纤激光器在锁模性能方面已取得显著进展，然而在 1 μm 波段，面对实际应用中对更高稳定性和普适性的需求，现有优化机制仍需进一步深入探究。

因此，本文提出一种基于 NALM 机制的全保偏色散管理掺铒光纤激光器，在近零色散条件下对比 50:50、40:60、30:70 三种耦合比的激光输出特性，探究不同耦合比对于锁模阈值与脉冲信噪比的作用规律，定量揭示非对称耦合调控腔内功率循环、平衡非线性效应的内在机理。结果表明，当耦合比为 30:70 时，该激光器在 210 mW 的泵浦功率下即可自启动，适当调节光栅对间距并将泵浦功率调至 64 mW 后，可获得中心波长 1030 nm、重复频率 34.782 MHz、脉宽 1.908 ps 的锁模脉冲，其信噪比高达 81 dB，平均输出功率为 1.62 mW。此外，进一步增大非对称耦合比可有效抑制腔内非线性效应，从而使光谱逐渐趋于平滑。本文

从实验角度深化了对 NALM 锁模机制中耦合比对阈值行为与稳定机制的理解，对提升九字型光纤激光器性能具有重要参考价值。

2 实验装置及原理

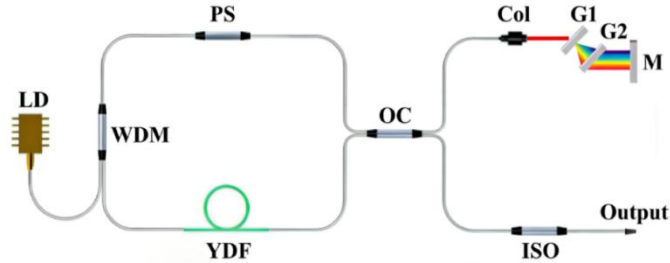


图 1 全保偏九字型掺镱光纤激光器的示意图 LD: 激光二极管; WDM: 波分复用器; PS: 相移器; YDF: 掺镱光纤; OC: 光学耦合器; Col: 准直器; G1/G2: 光栅; M: 反射镜; ISO: 隔离器

Fig. 1 Schematic diagram of the all-PM Yb-doped figure-9 fiber laser. LD: laser diode; WDM: wavelength division multiplexer; PS: phase shifter; YDF: Yb-doped fiber; OC: Optic coupler; Col: collimator; G1/G2: gratings; M: mirror; ISO: isolator.

全保偏九字型掺镱光纤激光器实验装置如图 1 所示: 整个激光系统由 NALM 环与线性臂两部分构成, 二者通过 2×2 光纤耦合器 (OC) 相连接。其中, NALM 环包括一个 976/1030 nm 波分复用器 (WDM), 一段 0.55 m 的掺镱增益光纤 (Nufern, PM-YSF-HI-HP, YDF) 及一个非互易相移器 (PS)。YDF 被不对称放置, 由最大输出功率为 800 mW 的 976 nm 激光二极管 (LD) 通过 WDM 进行泵浦。而对于线性臂部分, 通过光纤准直器 (Col) 和反射镜 (M) 连接至 OC 的耦合比较大的一侧, 该反射镜能够将输出光束反射回 NALM 环路。此外, 在两者中间插入一对 1000 lines/mm 的透射光栅 (Lightsmth, G1/G2), 通过调整其间距来补偿整个谐振腔累积的正常色散, 从而确保实验过程均在色散管理孤子模式下运行。OC 的另一侧则连接隔离器 (ISO) 作为输出端口。值得注意的是, 本实验分别采用耦合比为 50:50、40:60 和 30:70 的输出耦合器 (OC) 进行锁模操

作，由于光纤熔接长度存在差异，净腔色散会呈现轻微浮动；同时实验中所有器件尾纤均为 PM 980 光纤，其快轴阻塞。

在该实验装置中，入射光经 OC 分为传播方向相反的两束光：透射方向的光经 OC 后输出激光，反射方向的光经 OC 后由反射镜反射并重新进入环路，该结构中反射率与环中两个相反方向的光的非线性相移差之间的关系为^[26,27]：

$$|E_{out}|^2 = |E_{in}|^2 \left\{ 2\alpha(1-\alpha) \left[1 + \cos \left[(1-2\alpha) |E_{in}|^2 \times 2\pi n_2 L / \lambda \right] \right] \right\} \quad (1)$$

$$R = \frac{|E_{out}|^2}{|E_{in}|^2} = \left\{ 2\alpha(1-\alpha) \left[1 + \cos \left[(1-2\alpha) |E_{in}|^2 \times 2\pi n_2 L / \lambda \right] \right] \right\} \quad (2)$$

式中， E_{in} 和 E_{out} 分别表示入射光和输出反射光强度， $\Delta\varphi_{NL} = |E_{in}|^2 \times 2\pi n_2 L / \lambda$ 表示非线性相移差， α 表示耦合器的分束比， L 表示环路中光纤的长度； n_2 为非线性克尔系数； λ 为入射光的波长； R 反射率。其中，自启动锁模能力取决于九字型光纤激光器中两束反向传播光束的相位差。当加入 PS 后使得整个腔内的反射率与非线性相移差关系式变为：

$$R = 2\alpha(1-\alpha) \left\{ 1 + \cos [\Delta\varphi_0 + (1-2\alpha) \times \Delta\varphi_{NL}] \right\} \quad (3)$$

式中 $\Delta\varphi_0$ 表示相移器引入的线性相移，其反射率随非线性相移差量变化的传输曲线如图 2 所示。

当未在激光腔中引入 PS，其反射曲线在低光强条件下表现为负反馈状态（如蓝色曲线所示），即其反射率随 $\Delta\varphi_{NL}$ 的累积而逐渐降低，这导致激光器工作点趋向于连续波模式，而非锁模脉冲状态（A 点）。当在腔内引入 PS 的 $-\pi/2$ 相位偏置，会导致透射曲线出现偏移（红色曲线），使激光器最初在正反馈区域工作。具体而言，从 B 点到 C 点，随着非线性相移 $\Delta\varphi_{NL}$ 的增长，反射率迅速达到最大值。此时，脉冲中央较强部分的相移接近 π ，这部分高能量光被反射，而脉冲两翼能量较低的部分则被透射，从而实现对脉冲的窄化完成锁模。

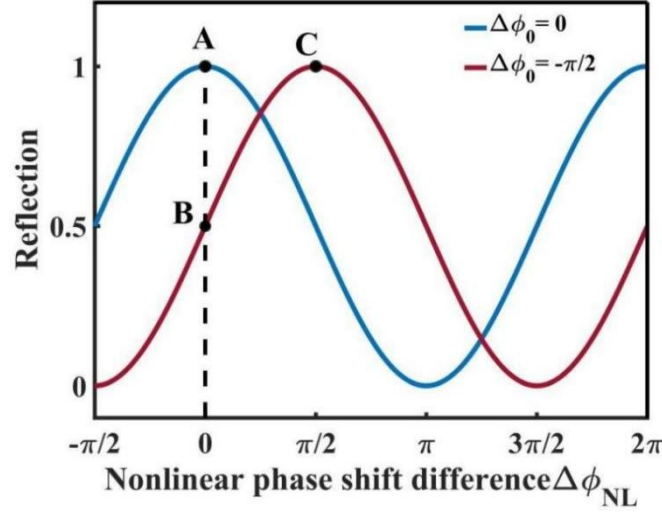


图 2 九字型光纤激光器在不同线性相移差下的传输曲线

Fig. 2 Transmission curves of figure-9 fiber laser with different linear phase shift difference.

在本实验中使用分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪（Yokogawa, AQ6370D）观察输出的锁模脉冲光谱；利用 3 GHz 高速实时示波器（RIGOL, DS70504）和 2 GHz 带宽的 InGaAs 光电探测器（Electro-Optics Technology, ET-3000）检测时域上的脉冲序列。采用频谱分析仪（Keysight, N9010B）记录射频（RF）谱，通过商用自相关仪（A.P.E, SM2000）测量脉冲宽度，并使用功率计（Ophir, 50(150)A-BB-26-V1）测量输出功率。

3 实验结果及讨论

通常而言，九字型光纤激光器的自启动需要在高于稳定工作点的高泵浦功率下实现，这是因为其工作原理依赖于基于自振幅调制的快速可饱和吸收体，对于低峰值功率的长噪声脉冲具有较小的锁模力^[28]。因此，在泵浦功率 300 mW、耦合比 50:50 的条件下，激光器以多脉冲状态自启动；随后将光栅对间距调至 2.92 cm 以进行色散补偿，能够有效避免因非线性效应过强而可能引发的脉冲分裂，从而使激光器在泵浦功率降至 80 mW 时进入稳定的色散管理孤子运转状态，测得平均输出功率为 4.02 mW（如表 1 所示）。输出光谱以对数和线性两种刻度表

示，分别如图 3(a) 和(b) 所示，其中心波长为 1030.06 nm，对应的 3 dB 带宽为 16.7 nm。受非线性效应影响，线性坐标下的光谱呈现出轻微调制。值得注意的是，光栅间距固定后即便泵浦功率在锁模区间内调节，波长无红移与蓝移，长时间运行光谱轮廓与带宽均保持稳定。此外，光栅对实现精准色散补偿，使腔体稳定工作于色散管理孤子态，同时可饱和吸收效应与保偏结构能够共同抑制脉冲畸变。图 3(c) 展示了输出脉冲的自相关轨迹及 Gaussian 函数拟合曲线，实测脉冲宽度为 2.891 ps。图 3(d) 的示波器轨迹显示了相邻脉冲间的时间间隔为 29.2 ns，这与该腔的往返时间一致。射频频谱如图 3(e) 所示，其在分辨带宽（RBW）为 10KHz 的条件下基频重复频率为 34.246 MHz。基频的信噪比（SNR）为 75 dB，在 1 GHz 范围内未检测到杂散频率成分（插图），这表明该激光系统稳定性优异。

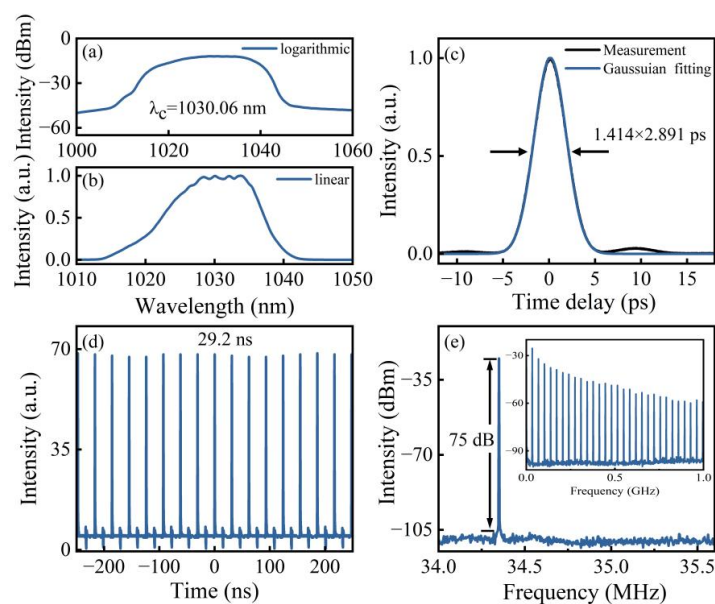


图 3 耦合比为 50: 50 时脉冲输出特性 (a) 与(b) 光谱（以对数和线性两种刻度表示）；
(c) 自相关轨迹； (d) 脉冲序列； (e) 射频频谱（插图： 1-GHz 频率范围）

Fig. 3 Pulse output characteristics under 50:50 coupling ratio. (a) and (b) spectrum (representation in Logarithmic and Linear Scales); (c) Autocorrelation trace; (d) Pulse train; (e) RF spectrum (inset: 1-GHz frequency range).

表 1 不同耦合比下的典型输出参数

Table 1 Typical output parameters for different coupler ratios.

配置	配置 1	配置 2	配置 3
耦合比	50: 50	40: 60	30: 70
自启动泵浦 阈值	300 mW	260 mW	210 mW
锁模泵浦阈值	80 mW	72 mW	64 mW
平均输出功率	4.02 mW	2.32 mW	1.62 mW

随后将原有 50: 50 的替换为耦合比为 40:60 的 OC 后, 激光器在 260 mW 泵浦功率下即可自启动。进一步调节光栅间距至 2.89 cm 并优化功率至 72 mW, 即可实现锁模, 其脉冲输出特性如图 4 所示。其中图 4(a) 给出了锁模的中心波长为 1029.87 nm, 3 dB 带宽为 12.2 nm。与耦合比为 50: 50 的配置一样, 受非线性效应的影响光谱依旧呈现出轻微调制。图 4(b) 绘制了输出脉冲相应的自相关曲线, 通过 Gaussian 函数对脉冲轮廓进行拟合, 可以得到锁模脉冲的宽度为 2.244 ps。图 4(c) 呈现出在基频为 34.364 MHz 时的 SNR 为 76 dB, 且在 1 GHz 范围内未检测到杂散频率成分(插图), 两者充分证明了其单脉冲运行及脉冲间稳定性。对比上述实验中两种不同耦合比下的配置结果可知, 耦合比显著影响自启动阈值、锁模阈值、光谱特性及 SNR。

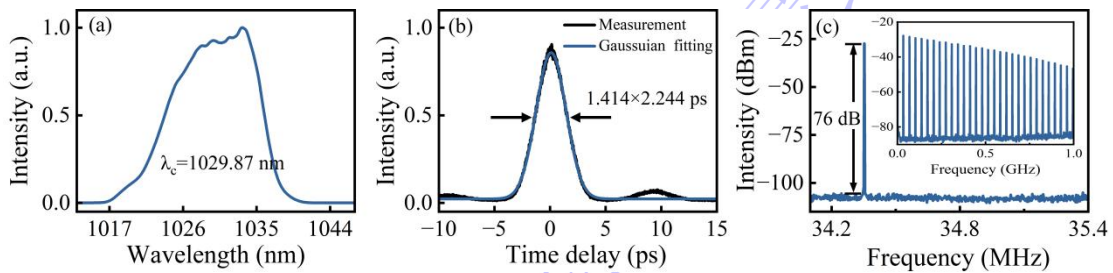


图 4 耦合比为 40: 60 时脉冲输出特性 (a) 光谱 (线性); (b) 自相关轨迹; (c) 射频频谱
(插图: 1-GHz 频率范围)

Fig. 4 Pulse output characteristics under 40:60 coupling ratio. (a) spectrum (Linear Scales); (b) Autocorrelation trace; (c) RF spectrum (inset: 1-GHz frequency range).

另一方面，该激光器作为种子源，在啁啾脉冲放大系统中，光谱的平滑性至关重要。平滑的光谱能够有效抑制放大过程中非线性相移（如自相位调制 SPM 引起的非线性相移）的积累，从而减轻光谱展宽和畸变。这有助于维持放大过程中的脉冲时域与频域质量，最终实现高质量的脉冲压缩，获得接近变换极限的飞秒或皮秒脉冲。基于上述分析，进一步将耦合比更换为 30:70，以在较低泵浦功率下实现自启动的同时，获得更加平滑的光谱特性，有利于啁啾脉冲放大系统中的高质量脉冲产生。

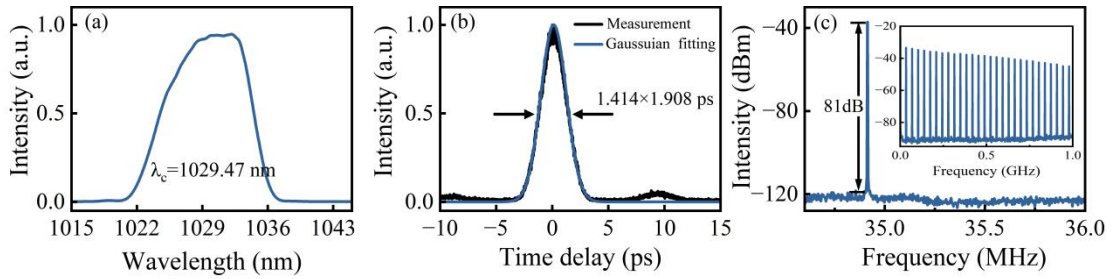


图 5 耦合比为 30: 70 时脉冲输出特性 (a) 光谱 (线性); (b) 自相关轨迹; (c) 射频频谱
(插图: 1-GHz 频率范围)

Fig. 5 Pulse output characteristics under 30:70 coupling ratio. (a) spectrum (Linear Scales); (b) Autocorrelation trace; (c) RF spectrum (inset: 1-GHz frequency range).

当耦合比为 30: 70 时，激光器在 210 mW 泵浦功率下以多脉冲的状态自启动，进一步调节光栅间距至 2.86 cm 并优化功率至 64 mW，即可获得稳定的锁模运转。对比上述实验与表 1 中的数据，发现当耦合比为 30:70 时锁模阈值最低，同时较大的耦合比有助于实现自启动锁模现象。从锁模的物理本质看，NALM 实现自启动的核心在于环内顺时针与逆时针两束光通过克尔效应积累的非线性相移差需接近 $\pi/2$ ，以形成足够强的等效可饱和吸收，从而抑制连续波振荡并实现脉冲的快速窄化。当耦合比为 50:50 时，两束光获得几乎均等的强度，非线性相移相互抵消，相移差积累缓慢、幅值较低，必须依赖更高的泵浦功率提升腔内峰值光强才能满足锁模相移条件；同时，对称结构带来的等效可饱和吸收深度较浅，

对低能量噪声脉冲的筛选与钳制能力较弱，且腔内功率循环效率偏低，大量能量直接经耦合器输出而无法有效累积，致使锁模启动与稳定运转的泵浦阈值显著偏高。相比之下，30:70 非对称耦合比打破了腔内双向光束的光强对称性，增大两路光束的能量分配差异，在低泵浦功率下即可积累大幅非线性相移差，同时非对称强度分布还提升了 NALM 的等效可饱和吸收深度与滤波能力，在脉冲形成过程中更高效地压制脉冲边缘弱信号和腔内连续波背景噪声，同时更多光功率被约束在 NALM 环内循环放大，有效提高了腔内功率循环效率与增益利用效率，使得在更低泵浦注入下即可达到锁模非线性条件。由此，30:70 耦合比从非线性相移差构建、可饱和吸收效应增强和腔内功率分配优化三个核心层面，系统性地降低了锁模阈值并提升了自启动性能。在图 5(a) 所示的输出光谱中，由于腔内非线性效应被有效抑制，光谱呈现平滑特征，其中心波长为 1029.47 nm，3 dB 带宽为 10.25 nm。自相关曲线如图 5(b) 所示，经 Gaussian 函数拟合后的脉冲持续时间为 1.908 ps。由图 5(c) 可见，基频 34.782 MHz 处的信噪比达 81 dB，且 1 GHz 频带内未观测到杂散信号，表明该激光系统具有优异的稳定性。这一高稳定性主要源于 NALM 自身滤波效应对强度噪声的抑制，而非对称耦合比所带来的增强非线性相移差进一步强化了此种滤波能力，从而提高了模式选择性与背景噪声压制效果；同时，NALM 结构凭借强等效可饱和吸收效应可有效抑制连续波背景与边模噪声，而全保偏光纤架构则从根本上消除了偏振扰动带来的频谱畸变与杂峰。因此，适当调节耦合比可以优化 NALM 对强度噪声的抑制性能，在实现低锁模阈值的同时显著提升激光系统的长期稳定运转能力。此外，在耦合比为 30:70 的配置下，测量了其输出功率的稳定性。以 1 s 的时间间隔持续监测并记录平均功率，结果如图 6 所示。5 小时内记录得到的功率均方根 (RMS) 波动为 0.12%，

表明锁模状态具有较高的稳定性。

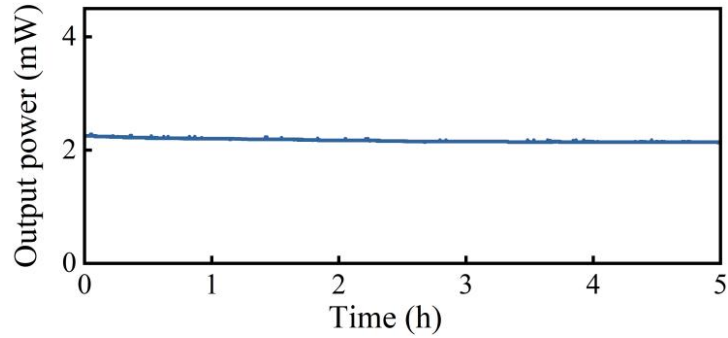


图 6 5 小时功率稳定性

Fig. 6 5 hour power stability.

4 结 论

本文通过实验系统研究了全保偏 NALM 掺镜光纤激光器中 50: 50、40: 60 和 30: 70 三种不同输出耦合比对锁模阈值与脉冲 SNR 的影响。实验结果表明，当耦合比为 30: 70 时锁模阈值最低，同时较大的非对称耦合比能够有效优化腔内功率循环效率与非线性效应的动态平衡，有助于实现自启动锁模与 SNR 的提升。随着非对称耦合比的增大，腔内非线性相位累积得到有效抑制，光谱平滑度与脉冲稳定性同步提升。该研究从实验层面验证了 NALM 锁模机制中耦合比—非线性—稳定性三者之间的内在关联，为低阈值、高稳定光纤种子源的优化设计提供了重要参考。所研制的全保偏结构激光器兼具低阈值、高稳定与低噪声特性，作为一种高性能种子源，在太赫兹产生、光学频率梳及超快光谱学等领域具有良好的应用潜力。

参考文献

- [1] Sakurai H, Konishi K 2023 *Opt. Express* **31** 40748
- [2] Shi H, Song Y, Li R, Li Y, Cao H, Tian H, Hu M 2018 *Nanotechnology and*

- [3] Subramanian K, Andrus L, Pawlowski M, Wang Y, Tkaczyk T, Ben-Yakar A 2021 *Biomed. Opt. Express* **12** 4779
- [4] Yang Y T, Zou Y, Zeng Q, Song Y F, Wang K, Wang Z H 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 134205 (in Chinese) [杨亚涛, 邹媛, 曾琼, 宋宇锋, 王可, 王振洪 2022 物理学报 **71** 134205]
- [5] Fu W, Wright L G, Sidorenko P, Backus S, Wise F W 2018 *Opt. Express* **26** 9432
- [6] Gao G, Wang S, Zhao Q, Cong Z, Liu Z, Zhao Z 2022 *Opt. Lett.* **47** 5869
- [7] Mashiko Y, Fujita E, Tokurakawa M 2016 *Opt. Express* **24** 26515
- [8] Kivistö S, Hakulinen T, Kaskela A, Aitchison B, Brown D P, Nasibulin A G, Okhotnikov O G 2009 *Opt. Express* **17** 2358
- [9] Ahmad H, Kamaruzzaman K, Samion M Z 2024 *IEEE J. Quantum Electron.* **60** 1
- [10] Kovalchuk O, Lee S, Moon H, Armani A M, Song Y W 2024 *npj 2D Mater. Appl.* **8** 3
- [11] Yun L 2017 *Opt. Express* **25** 32380
- [12] Kieu K, Wise F W 2008 *Opt. Express* **16** 11453
- [13] Raabe N, Feng T, Mero M, Tian H, Song Y, Hänsel W, Steinmeyer G 2017 *Opt. Lett.* **42** 1068
- [14] Wu Z, Liu D, Fu S, Li L, Tang M, Zhao L 2016 *Opt. Express* **24** 18764
- [15] Wang Z, Wang D N, Yang F, Li L, Zhao C, Xu B, Fang Z 2017 *J. Lightwave Technol.* **35** 5280
- [16] Jiang H, Li H, Hu F, Ren X, Li C, Xu S 2020 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **32**

- [17] Chen Z, Yang Z, Li Z, Lv Z 2025 *J. Lightwave Technol.* **43** 10659
- [18] Yan D, Li X, Zhang S, Liu J 2021 *Opt. Express* **29** 9805
- [19] Jiang T, Cui Y, Lu P, Li C, Wang A, Zhang Z 2016 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **28** 1786
- [20] Duan D, Wang J, Wu Y, Ma J, Mao Q 2020 *Opt. Express* **28** 33603
- [21] Deng D, Zhang H, Gong Q, He L, Li D, Gong M 2020 *Opt. Laser Technol.* **125** 106010
- [22] Yang K, Li J, Wu J, Hu A, Hao Q, Peng J, Zeng H 2022 *Opt. Lett.* **47** 4095
- [23] Chen W B, Li T J, Tong L Y, Yang K, Liu M, Luo A P, Zhang Z R, Luo Z C, Xu W C 2023 *Opt. Express* **31** 2902
- [24] Xiong S, Luo D, Liu Y, Wang W, Deng Z, Tang Z, Xie G, Zhou L, Zuo Z, Gu C, Li W 2022 *Opt. Express* **31** 514
- [25] Li X, Li S, Li X, Wang Y F, Cheng Z, Xiong Y T, Cao X R, Feng Y, Zhou J Q 2024 *Opt. Express* **32** 11271
- [26] Doran N J, Wood D P 1988 *Opt. Lett.* **13** 56
- [27] Fermann M E, Haberl F, Hofer M 1990 *Opt. Lett.* **15** 752
- [28] Zhang H, Xia H, Zheng J, Li J, Zhang F, Fan M, Zhu Q 2024 *Opt. Express* **32** 25223

Research on influence of asymmetric coupling ratio on laser performance in all-PM NALM fiber laser*

CHEN Zhen¹⁾ YANG Zhi²⁾ LI Ze¹⁾ LV Zhiguo^{1†)}

1) (School of Physical Science and Technology, Inner Mongolia University, Hohhot, 010021)

2) (Zhejiang Provincial Innovation Center of Laser Intelligent Equipment Technology, 325200, Wenzhou)

Abstract

Currently, the 1 μm waveband laser is one of the most widely used ultrafast laser sources. In general, traditional lasers suffer from poor stability and high noise levels. Exploring the regulation mechanism for laser performance in this waveband and developing low-noise and high-stability seed sources that meet practical application requirements have become urgent needs in this field. In this work, we construct a dispersion-managed all-polarization-maintaining (PM) figure-9 Yb-doped fiber laser based on a nonlinear amplifying loop mirror (NALM). A tunable grating pair is incorporated into the cavity to enable dynamic dispersion control. The influences of three different coupling ratios (50:50, 40:60, and 30:70) on the laser performance are comparatively investigated. Compared with 50:50 and 40:60 configurations, the case with a 30:70 coupling ratio achieves more stable self-starting mode-locking at a pump power of 210 mW. Furthermore, by optimizing net cavity dispersion to the near-zero dispersion region, stable pulses centered at 1030 nm are obtained with a pump power of 64 mW. This state exhibits the optimal laser performance. The pulses have a repetition rate of 34.782 MHz and a pulse duration of 1.908 ps. The measured signal-to-noise ratio (SNR) is as high as 81 dB. More importantly, as the asymmetric coupling ratio increases, the nonlinear effects within the cavity are effectively suppressed, and the spectrum gradually becomes smoother. In chirped pulse amplification systems, spectral smoothness is crucial. Smooth spectra can effectively suppress the accumulation of nonlinear phase shifts during the amplification process, thereby reducing spectral broadening and distortion. This helps to obtain much better pulse quality. This work also reveals that a high coupling ratio can optimize the dynamic balance between cavity power cycle efficiency and nonlinear effects, thereby effectively reducing the threshold of the NALM mode-locking and enhancing the

stability of pulses. As a low-threshold, high-stability seed source, this laser has broad application prospects in terahertz generation, optical frequency combs, and ultrafast spectroscopy.

Keywords: nonlinear amplifying loop mirror, low-threshold, highly stable, coupling ratio

* Project supported by the Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region of China under (Grant No. 2025MS01009), the National Natural Science Foundation of China (NSFC) under (Grant No. 12164030), the Zhejiang Provincial Key Technologies R&D Project under (Grant No. 2024SJCZX0039).

† Corresponding author. E-mail: lvzhiguo@imu.edu.cn
The first author. E-mail: 17531079752@163.com

录用稿件，非最终出版稿