

基于Sagnac滤波器的可调谐掺镱锁模 光纤激光器研究

宋华溢, 王 蓊*, 杜沅朋, 夏敬华

长春理工大学, 吉林省固体激光技术与应用重点实验室, 吉林 长春

收稿日期: 2024年2月18日; 录用日期: 2024年3月20日; 发布日期: 2024年3月27日

摘 要

为了在光纤激光器中获得具有中心波长可调谐的锁模脉冲输出, 采用半导体可饱和吸收镜和Sagnac环作为腔镜, 搭建了线性腔掺镱锁模光纤激光器, 并进行了实验验证。通过调节泵浦功率和Sagnac环中的偏振控制器, 在泵浦功率140 mW保偏光纤长度为18 cm时获得最大的调谐范围输出, 输出中心波长从1032.53 nm连续调谐至1043.76 nm, 调谐范围为11.23 nm。该研究可以为搭建结构紧凑的可调谐激光器提供设计方案。

关键词

Sagnac滤波器, 可调谐, 锁模, 光纤激光器

Research on Tunable Ytterbium Doped Mode-Locked Fiber Laser Based on Sagnac Filter

Huayi Song, Ji Wang*, Yuanpeng Du, Jinghua Xia

Jilin Province Key Laboratory of Solid State Laser Technology and Applications, Changchun University of Technology, Changchun Jilin

Received: Feb. 18th, 2024; accepted: Mar. 20th, 2024; published: Mar. 27th, 2024

Abstract

In order to obtain mode-locked pulse output with tunable central wavelength in fiber lasers, a li-

*通讯作者。

near cavity ytterbium doped mode-locked fiber laser was constructed using semiconductor saturable absorption mirrors and Sagnac rings as cavity mirrors, and experimental verification was conducted. By adjusting the pump power and polarization controller in the Sagnac ring, the maximum tuning range output was obtained at a pump power of 140 mW polarization maintaining fiber length of 18 cm. The output center wavelength was continuously tuned from 1032.53 nm to 1043.76 nm, with a tuning range of 11.23 nm. This study can provide a design solution for building compact tunable lasers.

Keywords

Sagnac Filter, Tunable, Locking Mode, Fiber Laser

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

锁模光纤激光器作为一种重要的光源，具有窄线宽、高功率和高稳定性等优点，已经成为许多应用中的关键元件[1] [2] [3] [4]。随着光通信和光谱分析等领域的迅速发展，单一波长的锁模脉冲激光器已经不能满足日常的满足人们科研、生活的需要。为了满足不同应用场景对于光纤激光器的需求，研究人员不断探索新的锁模光纤激光器结构和调谐方法[5] [6] [7] [8]。常见的可调谐的锁模光纤激光器大多都是基于光纤双折射的 Lyot 滤波器与锁模光纤激光器结合搭建的，并成功实现了可调谐锁模脉冲输出输出[9] [10]。2023 年张永熙等利用二阶 Lyot 滤波器加半导体可饱和吸收体的组合搭建了全光纤结构的全正色散掺镱锁模激光器，获得了从 1020 nm 到 1041 nm 最大调谐范围为 21 nm 的耗散孤子输出[11]。2023 年 Qiu H. 等人，使用全光纤结构可饱和(SA)，即渐变折射率多模光纤(GIMF)-阶跃折射率多模光纤(SIMF)，在掺镱锁模激光器中实现了中心波长从 1037.77~1024.83 nm 连续可调谐[12]。近几年来，光纤 Sagnac 环滤波器具有结构简单、高灵敏度、方便调节和高稳定性等优点，引起了科研人员广泛的兴趣。为了解决传统可调谐锁模脉冲光纤激光器调谐范围小等问题，通过将 Sagnac 滤波器与掺镱光纤激光器相结合的方法，进而增大激光器的锁模脉冲输出的可调谐范围。

本文将 Sagnac 环作为全光纤结构的光谱滤波器，半导体可饱和吸收镜(SESAM)作为锁模器件设计并搭建了结构紧凑的基于 Sagnac 滤波器的可调谐掺镱锁模激光器[13] [14]，实现了稳定的耗散孤子锁模脉冲输出，通过调节 Sagnac 滤波器内的偏振控制器改变光的偏振状态，进而改变光在环形光纤中的传播路径和干涉应，来实现耗散孤子的中心波长可调谐。

2. 实验装置及原理

基于 Sagnac 滤波器的可调谐掺镱锁模光纤激光器的实验结构图如图 1 所示。激光器为线形腔结构。由一台最大输出功率可达到 850 mW、输出中心波长为 976 nm 的激光二极管(Laser Diode, LD)与一个 980/1030 nm 的波分复用器(Wavelength Division Multiplexer, WDM)相连接，对一段长度为 0.3 m 的增益光纤(nLIGHT Yb-1200-4/125)进行泵浦。再经过一个偏振控 PC1 (Polarization Controller, PC)用来调节腔内的偏振态也可以辅助激光器锁模，然后经过 Sagnac 环输出。Sagnac 环不仅起到整形光谱的作用还起到滤波作用，其由一个 2*2 耦合比为 50:50 的耦合器(Optical Coupler, OC)、一段保偏光纤 PM980-XP 和一个偏

振控制器 PC2 构成。激光器的最左端为一个半导体可保和吸收反射镜(SESAM), 弛豫时间为 15 ps、调制深度为 18%、反射带宽为 70 nm)作为锁模器件来实现锁模脉冲输出, 总腔长为 6.3 m。

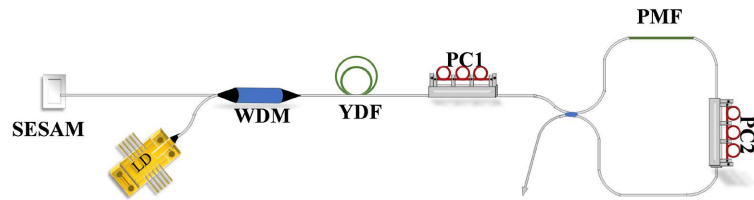


Figure 1. Laser experimental setup diagram

图 1. 激光器实验装置图

当信号光进入 Sagnac 环并通过 PMF 时, 信号光会被分成两个分量的光, 其中一个沿着保偏光纤的快轴方向进行传输, 另一个则沿着保偏光纤的慢轴方向进行传输, 但是因为 PMF 快轴和慢轴之间会存在折射率差, 所以就导致这两束光在 Sagnac 环中对向传输会产生一个相位差[15]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi L\Delta n}{\lambda} \quad (1)$$

在公式(1)中, Δn 为 PMF 快轴和慢轴之间的折射率差, 实验中 $\Delta n = 5 \times 10^{-4}$ 。L 表示 PMF 的长度, λ 就是该滤波器使用的工作波长, 在实验中 $\lambda = 1030 \text{ nm}$ 。当它们重新耦合器时会发生干涉耦合输出。Sagnac 滤波器的透射表达式[16]:

$$T = \sin^2 \theta \cos^2 \theta \quad (2)$$

θ 为 Sagnac 环中偏振控制器的偏转角度, $\Delta\varphi$ 为表示光场在保偏光纤中传输时快慢轴之间产生的相位差。计算可得相邻透射峰波长间距为[17]:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta n L} \quad (3)$$

从式(3)可以看出, 通过改变 PMF 的 Δn 以及 L, 即可实现波长调谐。利用 Matlab 对该 Sagnac 环进行仿真, 其输出端口透射光谱如图 2 所示。

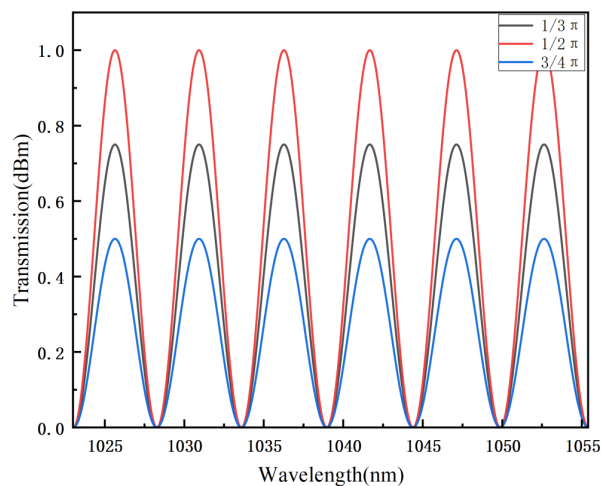


Figure 2. Effect of rotation angle on transmission spectrum

图 2. 旋转角度对透射光谱的影响

由图 2 可知, 改变偏振控制器的旋转角度, 透射谱对应的波长位置保持不变, 然而消光比会随偏振控制器旋转角度的改变而改变, 相邻两个峰值对应的波长间隔保持不变。旋转角度越接近 $\pi/2$, 输出光谱的消光比就越大。

3. 结果和分析

当泵浦功率为 90 mW 时, 调节腔内的偏振控制器 PC1 可以使激光器长时间且稳定的工作在锁模状态, 此时的输出功率为 3.252 mW。输出的光谱图如图 3 所示, 光谱具有陡峭的上升沿和下降沿, 为典型的耗散孤子, 其中心波为 1038.25 nm, 3 dB 带宽为 2.0634 nm, 单脉冲能量为 0.09 nJ。图 4 为输出脉冲序列, 此时的脉冲重复频率为 34.65 MHz, 与腔长相对应, 各脉冲的强度基本相同, 并没有明显的起伏, 表明激光器工作在稳定的锁模状态下。图 5 为脉冲自相关轨迹图, 此时测得的脉冲宽度为 13.72 ps。当泵浦功率为 90 mW 时, 仔细调节 Sagnac 滤波器内的偏振控制器, 可以获得中心波长可调谐的锁模脉冲输出, 如图 6 所示, 激光器的输出波长可从 1035.43 nm 连续调谐至 1040.54 nm, 调谐范围为 5.11 nm。值得一提的是, 在无外界环境干扰的情况下, 不同中心波长的谱线也能长时间维持稳定。

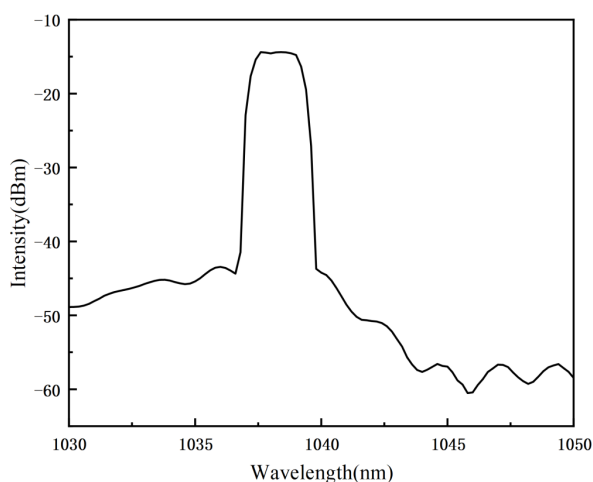


Figure 3. Spectral diagram

图 3. 光谱图

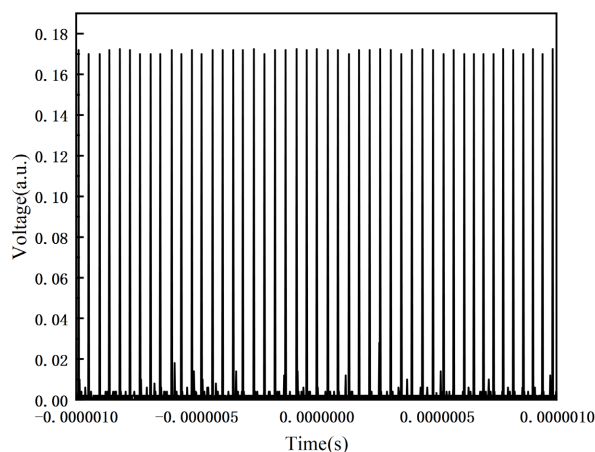


Figure 4. Oscilloscope trajectory diagram

图 4. 示波器轨迹图

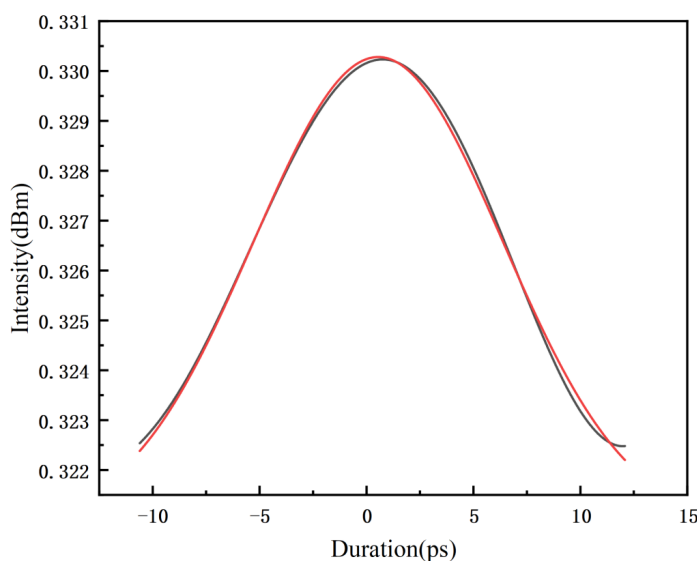


Figure 5. Pulse autocorrelation trajectory diagram

图 5. 脉冲自相关轨图

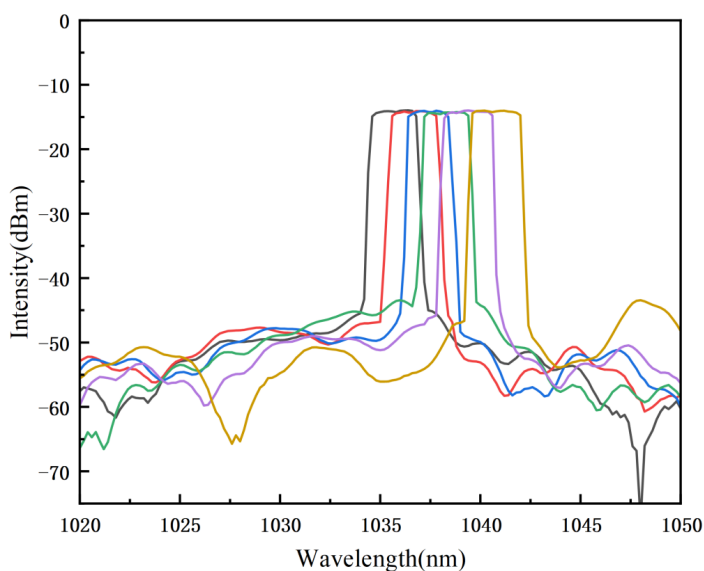


Figure 6. Tuned mode-locked spectrum at 90 mW pump

图 6. 泵浦 90 mW 时调谐的锁模光谱

实验测得了不同泵浦功率下的光谱如图 7 所示, 当泵浦功率从 90 mW 增加到 140 mW, 光谱宽度从 2.036 nm 增加到 3.012 nm。但其形状和中心波长的位置并没有发生明显的变化, 这个现象是由于增加光纤激光器的泵浦功率会增强非线性效应, 改变色散特性, 从而导致光谱展宽。

实验还记录了不同泵浦功率下的输出情况如图 8 所示, 当泵浦功率从 0 mW 增加到 140 mW, 输出功率从 0.053 mW 增大到 4.315 mW, 后续实验没有再继续增加泵浦功率, 是因为当泵浦功率大于 140 mW 时增益已经趋于饱和, 继续增加泵浦功率不仅不能再增加激光器的增益, 反而会增加光损耗, 导致激光器的效率下降。同时, 泵浦功率的增加会使 SESAM 表面的温度升高, 若没有良好的散热条件, 会对 SESAM 造成不可逆的损伤。观察示波器, 可以发现激光器可以始终保持稳定的锁模状态。

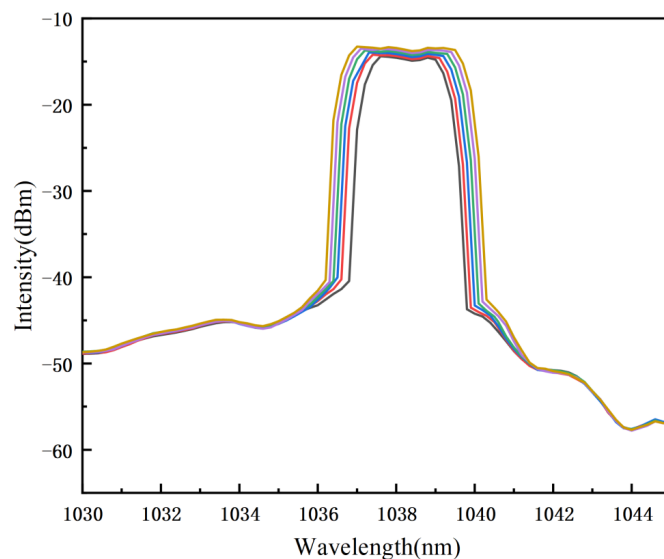


Figure 7. Output spectra under different pump powers

图 7. 不同泵浦功率下的输出光谱

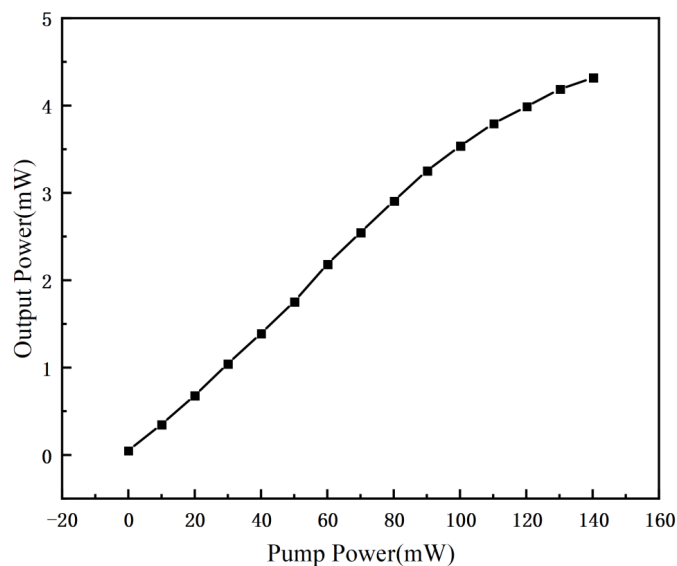


Figure 8. Changes in output power and pump power

图 8. 输出功率与泵浦功率变化

为了测试光谱的稳定性, 实验在泵浦功率为 90 mW 时每间隔十分钟测量一次光谱, 如图 9 所示, 可以发现光谱的中心波长一直在 1038.25 nm, 3 db 带宽一直为 2.0634 nm 且光谱形状在 1 小时内没有明显的变化。可以证明在外界条件不变的情况下, 激光器可以长时间的保持稳定。

保持 Sagnac 环滤波器内的保偏光纤长度为 20 cm 不变, 测得了不同泵浦功率下的输出调谐范围如图 10 所示, 发现随着泵浦功率的升高调谐范围也逐渐增大这是因为增加泵浦功率可以提高光纤激光器中的激光增益, 增加激光增益可以使激光器在更宽的频率范围内实现放大, 从而扩大调谐范围。同时, 增加泵浦功率可以增加激光器中的非线性效应, 进而扩大光纤的色散特性。扩大光纤的色散范围也可以使激光器在更宽的频率范围内实现调谐。

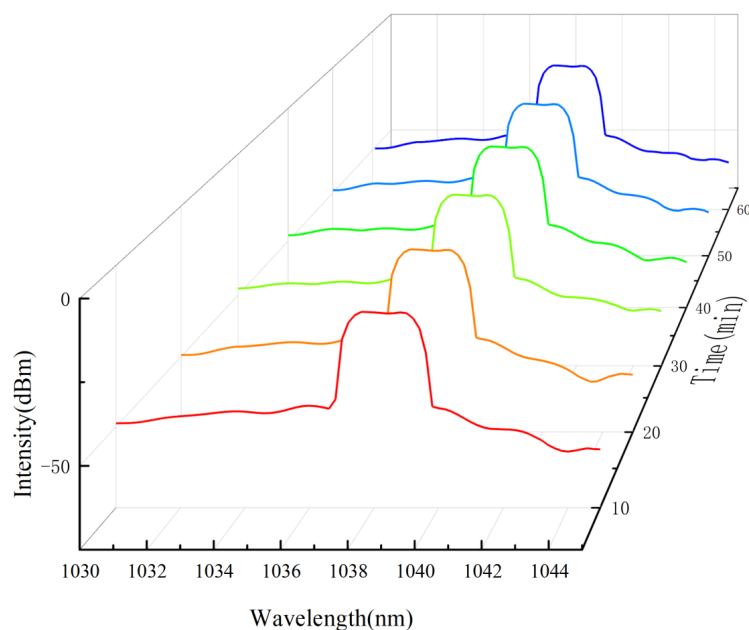


Figure 9. Spectral stability graph within 1 hour

图 9. 1 h 内光谱稳定性图

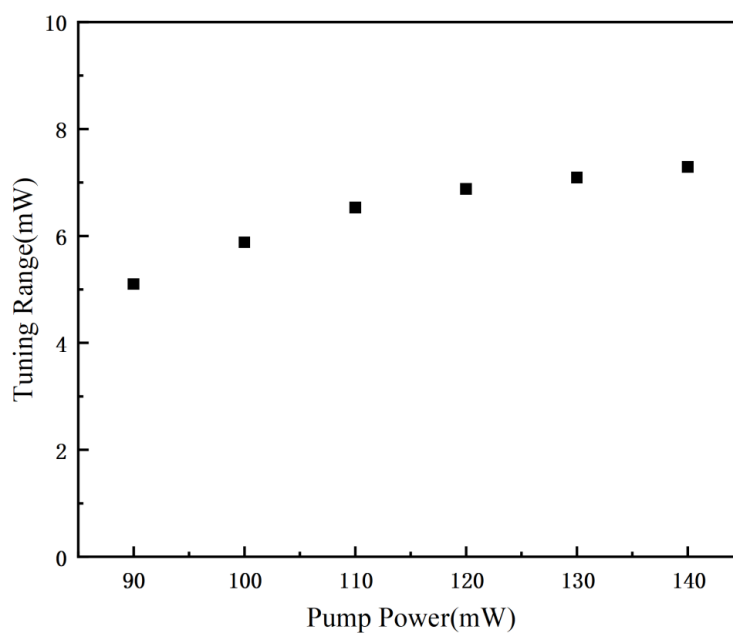


Figure 10. Different pump powers and tuning ranges

图 10. 不同泵浦功率与调谐范围

当泵浦功率为 140 mW 时获得最大的调谐范围，调节偏振控制器可以获得中心波长可调谐的锁模脉冲如图 11 所示。激光器的输出波长可从 1033.23 nm 连续调谐至 1040.52 nm，调谐范围为 7.29 nm。因此，适当的增大泵浦功率可以增大调谐范围，但是由于光纤激光器的饱和效应，调谐范围不会无限制的增大。同时，实验测量了不同中心波长时的输出功率如图 12 所示，当光谱的中心波长发生改变时，输出功率会有轻微的变化，但变化幅度不大。

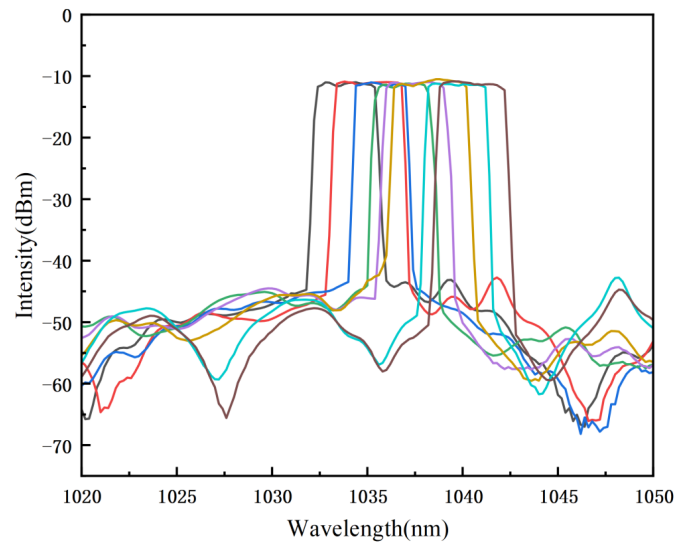


Figure 11. Tunable spectrum at a pump power of 140 mW

图 11. 泵浦功率 140 mW 时的可调谐光谱

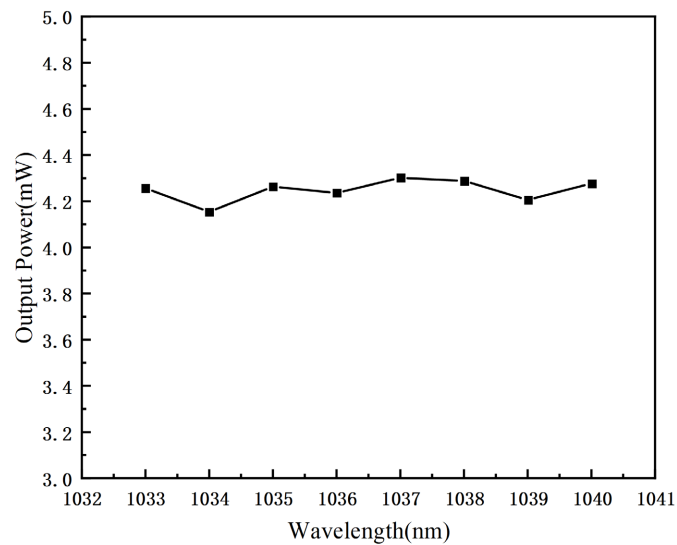


Figure 12. Changes in center wavelength and output power

图 12. 中心波长与输出功率变化

实验中改变了 Sagnac 滤波器中保偏光纤的长度，将保偏光纤的长度缩短为 18 cm，将泵浦功率增大至 140 mW，调节 Sagnac 滤波器中的偏振控制器可以获得中心波长可调谐的光谱，如图 13 所示。激光器的输出波长可从 1032.53 nm 连续调谐至 1043.76 nm，调谐范围为 11.23 nm。继续将保偏光纤的长度继续缩短为 16 cm，把泵浦功率增大至 140 mW 时，调节 Sagnac 滤波器中的偏振控制器可以获得中心波长可调谐的光谱，如图 14 所示。激光器的输出波长可从 1032.68 nm 连续调谐至 1042.97 nm，调谐范围为 10.29 nm。这是因为过短的保偏光纤长度会导致滤波器的自频移效应增强，从而使得滤波器的传输谱窄化。相反，过长的保偏光纤长度会导致滤波器的自频移效应减弱，从而使得滤波器的传输谱变宽。这会导致激光器的调谐范围受限，无法实现较大的频率调谐范围。因此，在适当的范围内改变保偏光纤的长度可以增大调谐范围，保偏光纤的长度过短或者过长都会限制调谐范围。

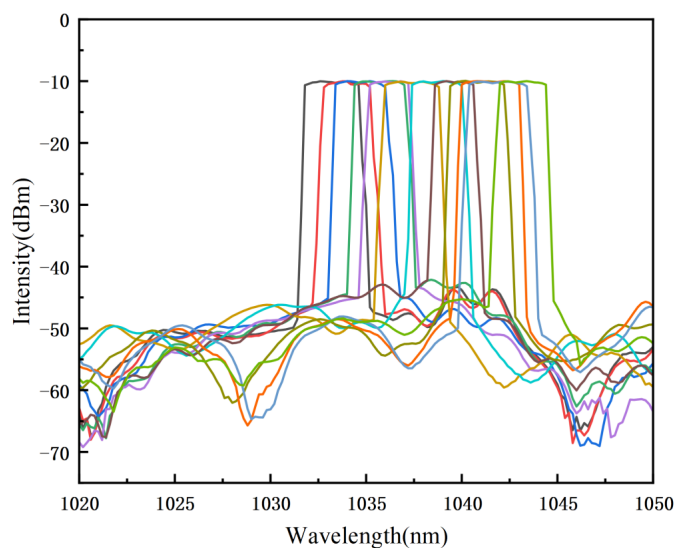


Figure 13. Tunable spectrum output at 18 cm PMF

图 13. PMF 18 cm 时输出可调谐光谱

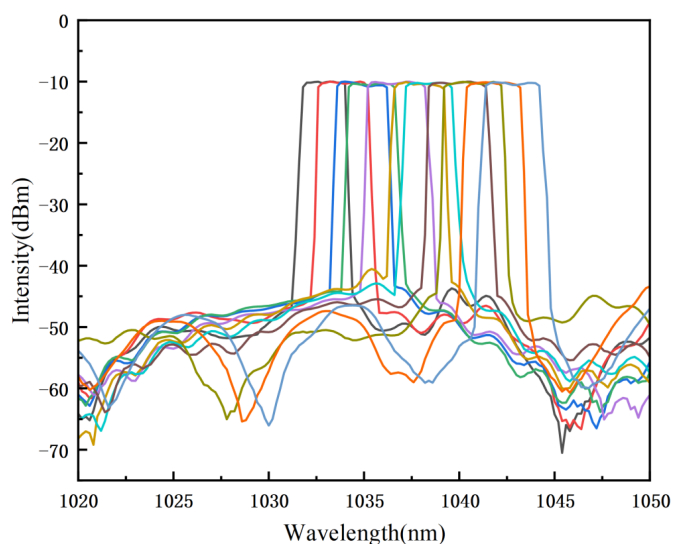


Figure 14. Tunable spectrum output at 16 cm PMF

图 14. PMF 16 cm 时输出可调谐光谱

4. 结论

在本文中我们利用半导体可保和吸收反射镜作为锁模器件结合 Sagnac 环滤波器搭建了掺镱锁模光纤激光器，通过调节 Sagnac 滤波器内的偏振控制器来实现耗散孤子的中心波长可调谐。最终获得了耗散孤子的中心波长可以从 1031.53~1043.76 nm 连续调谐，调谐范围为 11.23 nm。在调谐范围内，脉冲的重复频率为 34.65 MHz。实验结果有望在光通信、光传感和光谱分析等领域得到广泛应用，并为相关领域的技术发展和创新提供了可能性[18]。

参考文献

- [1] Hu, J., Xing, Z.K. and Zou, M. (2020) In-Fiber Dispersion Compensated Polarizer and Mode-Locked Fiber Laser Ap-

- plication. *IEEE Photonics Technology Letters*, **32**, 510-513. <https://doi.org/10.1109/LPT.2020.2981170>
- [2] Han, Y., Guo, Y., Gao, B., *et al.* (2020) Generation, Optimization, and Application of Ultrashort Femtosecond Pulse in Mode-Locked Fiber Lasers. *Progress in Quantum Electronics*, **71**, 100264. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2020.100264>
- [3] Wang, Y., Hou, S., Yu, Y., *et al.* (2021) Photonic Device Combined Optical Microfiber Coupler with Saturable-Absorption Materials and Its Application in Mode-Locked Fiber Laser. *Optics Express*, **29**, 20526-20534. <https://doi.org/10.1364/OE.426654>
- [4] Lou, Y., Shi, Y., Liu, S., *et al.* (2018) Preparation of Ultrathin Graphitic Carbon Nitride Nanosheet and Its Application to a Tunable Multi-Wavelength Mode-Locked Fiber Laser. *Optical Materials*, **86**, 382-386. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.10.037>
- [5] Lu, Y. and Yao, P. (2022) All-Fiber High Efficiency Wavelength-Tunable Mode-Locked Cylindrical Vector Beam Laser. *IEEE Photonics Journal*, **14**, 1-5. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2022.3167049>
- [6] Lang, J., Chen, C., Zhang, P., *et al.* (2023) C- and L-Bands Wavelength-Tunable Mode-Locked Fiber Laser. *Photonics*, **10**, 1379. <https://doi.org/10.3390/photonics10121379>
- [7] Ma, Z.L., Long, J.G., Lin, W., *et al.* (2021) Tunable Spatiotemporal Mode-Locked Fiber Laser at 1.55 μm . *Optics Express*, **29**, 9465-9473. <https://doi.org/10.1364/OE.415318>
- [8] 陈国良. 基于 DMD 可调谐被动锁模掺镱光纤激光器[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中央民族大学, 2020.
- [9] Zou, M., Ran, Y., Hu, J., *et al.* (2020) Multiwavelength Mode-Locked Fiber Laser Based on an All Fiber Lyot Filter. *IEEE Photonics Technology Letters*, **32**, 1419-1422. <https://doi.org/10.1109/LPT.2020.3029089>
- [10] Ding, J., Wen, Z., Lu, B., *et al.* (2021) Wavelength Switchable Dissipative Soliton Mode-Locked Fiber Laser Based on Lyot Filter. *Optics & Laser Technology*, **144**, 107460. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107460>
- [11] 张永熙. 基于 Lyot 滤波器的耗散孤子锁模光纤激光器研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 长春理工大学, 2023.
- [12] Qiu, H., Yao, Y., Wu, C., *et al.* (2023) Tunable-Wavelength Broadband Spectrum Dissipative Soliton Mode-Locked Fiber Laser. *Infrared Physics & Technology*, **134**, 104845. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2023.104845>
- [13] Stoliarov, D.A., Itrin, P.A., Ribenek, V.A., *et al.* (2020) Linear Cavity Fiber Laser Harmonically Mode-Locked with SESAM. *Laser Physics Letters*, **17**, 105102. <https://doi.org/10.1088/1612-202X/abacca>
- [14] Ouyang, C., Shum, P., Wang, H., *et al.* (2011) Wavelength-Tunable High-Energy All-Normal-Dispersion Yb-Doped Mode-Locked All-Fiber Laser with a HiBi Fiber Sagnac Loop Filter. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **47**, 198-203. <https://doi.org/10.1109/JQE.2010.2071374>
- [15] 张新. 基于可调谐 Sagnac 环的光纤激光器和光纤传感器的研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [16] 周飞, 周雪芳, 李曾阳, 等. 基于 Sagnac 环的波长可调谐的单双波长光纤激光器[J]. 光电子·激光, 2020, 31(1): 8-12. <https://doi.org/10.16136/j.joel.2020.01.0172>
- [17] 林加强, 戴川生, 姚培军, 等. 单波长和双波长可调谐的掺镱锁模光纤激光器[J]. 激光技术, 2023, 47(3): 301-304.
- [18] 朱晓军, 耿健, 章国安, 等. 基于 Sagnac 环的可调谐双脉冲耗散孤子掺 Yb 光纤激光器[J]. 光学学报, 2019, 39(4): 248-254.