

泵浦振荡器腔长调谐的光纤参量振荡器

牛志敏, 刘 军, 龙 钰, 杨康文*

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2025年4月21日; 录用日期: 2025年5月16日; 发布日期: 2025年5月26日

摘 要

介绍了一种泵浦振荡器腔长调谐的光纤参量振荡器, 研究了改变泵浦振荡器的腔长时, 光纤参量振荡器输出的波长调谐特性。泵浦振荡器经放大和选频后, 为光纤参量振荡器提供泵浦光。当选频比为10、泵浦振荡器的中心波长为1030 nm时, 泵浦振荡器的腔长改变0.8 mm, 等效于光纤参量振荡器的腔长改变8 mm, 在色散滤波的作用下, 光纤参量振荡器的波长在748.3~754.9 nm范围内可调谐。当在1030~1040 nm范围内改变泵浦振荡器的中心波长时, 采用上述方式, 光纤参量振荡器的输出波长在748.3~789.2 nm内可调谐。该方法仅通过改变泵浦振荡器的腔长, 就能实现光纤参量振荡器的波长调谐。相比传统改变光纤参量振荡器腔长的方案, 泵浦振荡器的腔长改变量仅为原来的选频比分之一, 有望用于快速调谐的光纤参量振荡器上。

关键词

腔长调谐, 光纤参量振荡器, 快速调谐

Wavelength Tunable Fiber Optical Parametric Oscillator via Cavity Length Tuning of Pump Oscillator

Zhimin Niu, Jun Liu, Yu Long, Kangwen Yang*

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 21st, 2025; accepted: May 16th, 2025; published: May 26th, 2025

Abstract

We introduce a fiber optical parametric oscillator with pump oscillator cavity length tuning and

*通讯作者。

文章引用: 牛志敏, 刘军, 龙钰, 杨康文. 泵浦振荡器腔长调谐的光纤参量振荡器[J]. 应用物理, 2025, 15(5): 397-404.
DOI: 10.12677/app.2025.155045

study the wavelength tuning characteristics of the output of the fiber optical parametric oscillator when the cavity length of the pump oscillator is changed. After amplification and frequency selection, the pump oscillator provides pump beam for the fiber optical parametric oscillator. When the frequency ratio is 10 and the center wavelength of the pump oscillator is 1030 nm, the cavity length of the pump oscillator changes by 0.8 mm, which is equivalent to a change of 8 mm in the cavity length of the fiber optical parametric oscillator. Under the effect of dispersion filtering, the wavelength of the fiber optical parametric oscillator can be tuned in the range of 748.3~754.9 nm. When changing the center wavelength of the pump oscillator within the range of 1030~1040 nm, using the above method, the output wavelength of the fiber optical parametric oscillator can be tuned within the range of 748.3~789.2 nm. This method can achieve wavelength tuning of fiber optical parametric oscillators by simply changing the cavity length of the pump oscillator. Compared with the traditional scheme of changing the cavity length of fiber optical parametric oscillators, the cavity length change of pump oscillators is only one of the original frequency selection ratios, which is expected to be used in fast tuning fiber optical parametric oscillators.

Keywords

Cavity Length Tuning, Fiber Optical Parametric Oscillator, Fast Tuning

Copyright © 2025 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

相干反斯托克斯拉曼散射(coherent anti-Stokes Raman scattering, CARS)成像技术是一种基于分子振动和转动特性的无标记光学成像方法[1], 能够以非侵入方式实现生物组织的显微成像, 并提供化学键信息[2] [3]。该技术因其特异性高、光损伤小等优势, 在生命科学领域得到了广泛应用[4] [5]。CARS 成像的实现依赖于两束超短脉冲激光, 即泵浦光和斯托克斯光, 这两束光在时间和空间上需完全同步且重合。当它们通过显微镜聚焦到样品上时, 会激发产生反斯托克斯信号[6], 通过该方式, 即可实现样品的相干反斯托克斯成像。目前, CARS 成像常用的光源主要包括两台同步的钛宝石固体激光器或基于固体激光器的光学参量振荡器(optical parametric oscillator, OPO) [7]。尽管固体 OPO 能够输出从紫外到中红外的宽带波长范围, 但需要调节晶体的角度或温度, 导致波长调谐速度较慢。此外, 固体激光器体积庞大、重量较重、制造成本高, 并需要定期维护[8], 这些因素限制了 CARS 成像技术在光学超净间以外的应用, 尤其是在医学研究领域的推广。近年来, 以掺杂稀土元素的光纤作为增益介质的光纤激光器, 因其结构紧凑、易于集成、光束质量优异、无需对准[9]等优势, 逐渐成为研究热点。特别是在光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)中, 基于四波混频(four-wave mixing, FWM) [10]-[12]的参量波长转换技术取得了显著进展, 为 CARS 成像技术的发展提供了新的方向。

2012 年, 耶拿大学的 Baumgartl M 等[13]报道了一种基于简并 FWM 的全光纤激光光源。该光源利用掺镱光纤激光器产生 1030 nm 的泵浦光, 并通过光子晶体光纤进行频率转换, 产成 785 nm 的信号光。这两束光可用于探测甲苯在 3050 cm^{-1} 处的芳香族 C-H 键拉伸振动的共振信号。2016 年, 明斯特大学的 Brinkmann M 等[14]提出了一种光纤参量振荡器(fiber optical parametric oscillator, FOPO)。该 FOPO 由泵浦激光二极管输出中心波长 1030 nm 的脉冲, 经掺镱光纤放大后泵浦光子晶体光纤, 基于四波混频效应和单模光纤构成的色散谐振器, 通过电调谐的光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)将泵浦振荡器的

重复频率调整 ± 1 kHz, 在不需要改变谐振腔的长度下, 实现了在 $8\ \mu\text{s}$ 内信号光波长在 $1130\sim 1310\ \text{nm}$ 范围内的可调谐输出。2018 年, 上海理工大学的杨康文等[15]提出并实现了一种工作在 $1\ \text{MHz}$ 低重复频率的全光纤光学参量振荡器。该装置改进了放大器和参量转换的结构, 在参量振荡器中内置放大器, 研究了该 OPO 在 1 、 2 、 $3\ \text{MHz}$ 重复频率下的输出频谱、信号功率等参数, 同时得到了 $2830\sim 2980\ \text{cm}^{-1}$ 范围内的乙醇 CARS 光谱, 验证了该方案在 CARS 检测中的可行性。2022 年, 东京大学的 Shun Takahashi 等[16]提出了一种基于光纤的波长可调谐光纤参量振荡器。通过采用波长可调的泵浦脉冲和由扫描振镜、 4-f 光学系统和衍射光栅组成的腔内光谱滤波器, 利用光子晶体光纤中的四波混频效应, 实现了 FOPO 在保持重复频率不变的情况下输出的信号光波长在 $832\sim 922\ \text{nm}$ 范围内调谐。

本文介绍了一种基于四波混频和色散滤波的低重复频率可调谐光纤参量振荡器。重点研究泵浦光波长为 $1030\ \text{nm}$ 时, 通过放大与选频技术, 结合光子晶体光纤和参量振荡器结构, 实现了仅通过调节泵浦振荡器的腔长即可实现信号光波长在 $748.3\sim 754.9\ \text{nm}$ 范围内调谐。与传统的光纤参量振荡器需要改变参量振荡器的腔长相比, 本设计的腔长调节量仅为传统方法的选频比分之一。这一创新设计不仅使光纤参量振荡器在保持高效波长调谐能力的同时, 还显著提升了系统的操作便捷性和实用性, 为低重复频率可调谐光源的开发提供了新的技术路径。

2. 实验装置

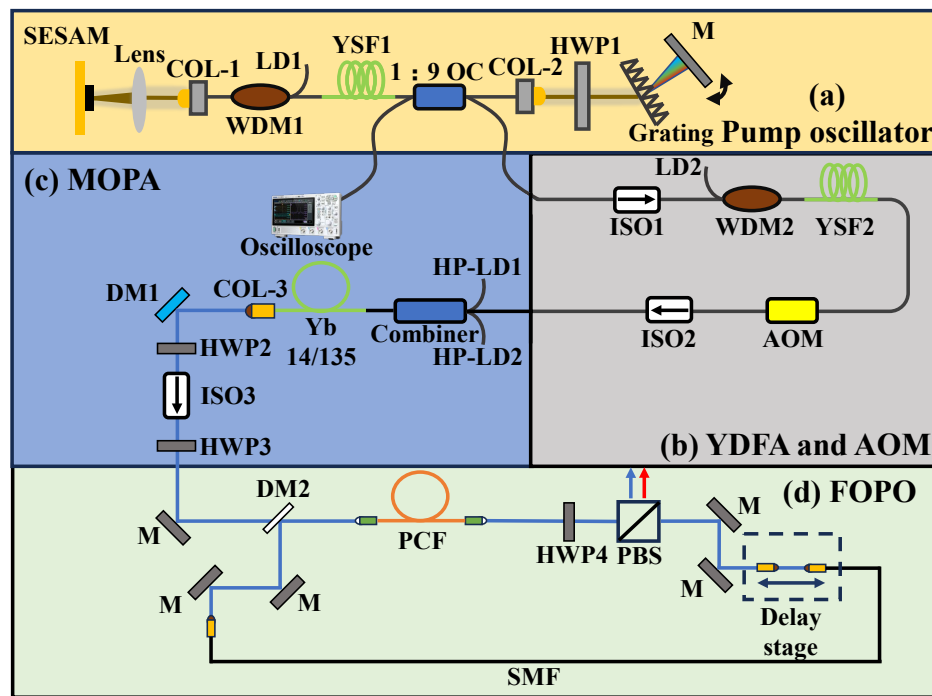


Figure 1. Experimental setup. (a) Pump oscillator; (b) Yb-doped fiber amplifiers and AOM; (c) Master Oscillator-Power Amplifier; (d) Fiber Optical Parametric Oscillator

图 1. 实验装置。(a) 泵浦振荡器; (b) 掺镱光纤放大器和声光调制器; (c) 主振荡功率放大器; (d) 光纤参量振荡器

实验装置如图 1 所示, 主要包括泵浦振荡器、预放大与选频模块、主振荡功率放大模块和光纤参量振荡器四部分。泵浦振荡器的结构是线性腔, 采用半导体可饱和吸收镜实现锁模。泵浦振荡器的泵浦光, 由半导体激光器 LD1 输出, 从 WDM1 反射端进入, 经公共端输出后泵浦增益介质 YSF1 (PM-YSF-HI-HP,

Nufern), 由于振荡器为线性结构且单程增益高, 所以仅需 20 cm 的单模保偏掺铒光纤即可实现锁模脉冲输出。YSF1 输出的光经 1:9 分束比的光耦合器分光, 10%用于监测锁模状态、测量光谱和频谱, 90%继续在腔内传输。在腔内传输的光经 COL-2 后转为空间光输出, 进入由半波片、衍射光栅(其刻线数为 1250, 在 1000~1100 nm 范围内的衍射效率均大于 90%)和反射镜组成的可调谐光学滤波器。通过调节半波片和光栅角度使衍射效率最高, 旋转反射镜的水平轴, 调节光栅与反射镜之间的角度, 可实现泵浦振荡器输出的激光波长在 1030~1040 nm 范围内调谐。振荡器的另一端由 WDM1 的透射端通过 COL-1 准直后, 经焦距为 30 mm 的聚焦透镜将光耦合至 SESAM。

泵浦振荡器锁模后输出的 1030 nm 泵浦光进入预放大和选频模块进行功率的初步放大和重复频率选择。半导体激光器 LD2 发射激光, 通过 WDM2 泵浦 1.2 m 的增益介质 YSF2, 可将泵浦光功率从 2 mW 放大至 120 mW。声光调制器采用 Gooch & Housego 公司生产的光纤耦合型 AOM (acousto-optic modulator), 用于在腔外实现频率选择, 改变泵浦光的重复频率。在泵浦振荡器与预放大器之间, 声光调制器和光纤合束器之间, 均设置了一个工作波长为 1030 nm 的光纤型隔离器, 作用是防止光回返, 避免回返光影响上一级系统的稳定性。

经声光调制器选频过的泵浦光进入主振荡功率放大模块以进一步提升功率。两个高功率半导体激光器发射激光, 通过光纤合束器泵浦 0.9 m 长的单模保偏双包层掺铒光纤 Yb 14/135 (DC-135/14-PM-YB, NKT Photonics), 可使选频过的泵浦光输出功率最高提升至 1 W, 经过准直器转为空间光输出。二向色镜 DM1 (HR: 1030 nm; HT: 980 nm)可以滤除高功率半导体激光器输出的 976 nm 光, 只反射 1030 nm 的泵浦光。两个半波片用于调节泵浦光的偏振态, 以满足相位匹配条件, 发生四波混频效应。

光纤参量振荡器包括一个二向色镜 DM2、一根 38 cm 的 PCF、一个输出耦合器、一个可调延时装置和 102 m 的单模光纤。本实验采用 NKT Photonics 公司生产的型号为 LMA-PM-5 的 PCF, 该光子晶体光纤的纤芯由熔融二氧化硅芯组成, 直径为 5 μm , 纤芯周围环绕着六边形气孔结构, 零色散波长为 1053 nm。为方便进行耦合, 光子晶体光纤两端均制成 FC/APC 跳线头, 耦合效率约为 60%。输出耦合器由半波片和偏振分束器构成, 用于控制参量振荡器的输出与反馈比。可调延时装置、单模光纤和二向色镜 DM2 (HR: 800 nm; HT: 1030 nm)用于构建反馈环路, 并将反馈的信号光再次耦合到光子晶体光纤中。单模光纤用于补偿参量振荡器的腔长使其重复频率与选频过的泵浦光重复频率相匹配, 可调延时装置用于改变参量振荡器的腔长以实现信号光波长的调谐。

3. 实验结果与讨论

在可调谐泵浦振荡器锁模后, 如图 2(a)所示, 采用光谱分析仪对振荡器在 1030~1040 nm 波长范围内的输出光谱进行了测量, 测得的光谱宽度范围在 0.10~0.16 nm。使用频谱仪测得振荡器的重复频率为 20 MHz, 使用功率计测量其输出功率约为 2 mW。通过调整反射镜的水平轴, 将泵浦振荡器输出的泵浦光波长调整到 1030 nm, 并开启预放大系统将泵浦光功率提升至 120 mW。如图 2(b)所示, 使用光谱分析仪对其光谱进行测量, 测得的光谱宽度为 0.15 nm, 同时使用脉冲自相关仪对其脉冲宽度进行测量, 测得的脉冲宽度为 15.6 ps。由于声光调制器有 3 dB 的插入损耗, 预放大的泵浦光经声光调制器选频后输出功率降至约 6 mW, 重复频率从 20 MHz 改变为 2 MHz。

主放大模块可将选频过的泵浦光输出功率最高提升至 1 W, 经放大的泵浦光再进入光子晶体光纤中进行参量转换。本实验使用的光子晶体光纤具有无截止单模特性, 这确保了泵浦光和产生的信号光之间有良好的空间重叠, 如图 2(c)所示, 计算了本实验使用的光子晶体光纤经四波混频的相位匹配图, 它显示了相位匹配的信号光和闲频光的波长由泵浦光波长决定。实验中 1030 nm 的泵浦光经主放大模块将功率提升到 410 mW 时, 由于四波混频效应引发的参量增益导致光学参量产生(optical parametric generation,

OPG), 1030 nm 的泵浦光激发光子晶体光纤产生波长 750 nm 的信号光和 1642 nm 的闲频光。随着泵浦光波长的改变, 新生成的信号光和闲频光的波长也会相应变化。如图 2(d)所示, 使用光谱分析仪测量的 1030、1032、1035、1038、1040 nm 的泵浦光经过声光调制器选频到 2 MHz 并放大到 410 mW 后, 激发光子晶体光纤在 OPG 下产生的信号光光谱, 其波长覆盖范围 750~790 nm, 光谱宽度在 2.01~4.53 nm 之间, 输出功率为 1.0~2.45 mW。

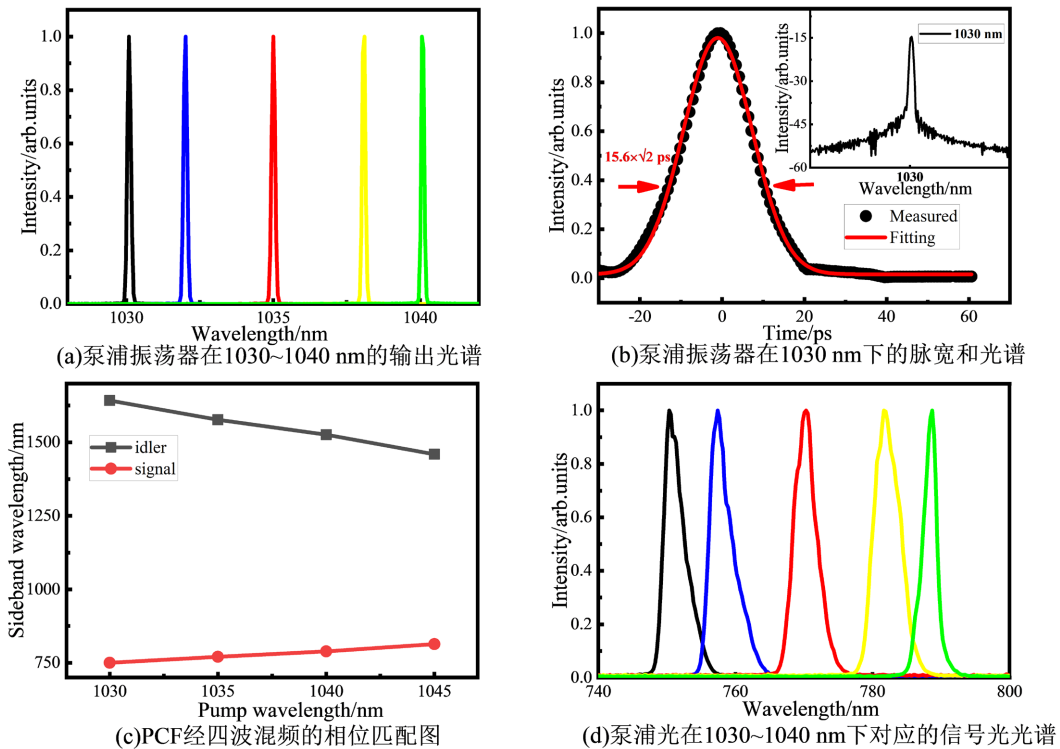


Figure 2. Output parameters of pump oscillator and parametric oscillator under OPG

图 2. 泵浦振荡器和参量振荡器在 OPG 下的输出参数

为了增强输出的信号光功率、优化信号光的光谱带宽, 本实验搭建了光学参量振荡器(OPO)。将泵浦光波长调节到 1030 nm, 泵浦光经选频并放大到 410 mW 后激发光子晶体光纤产生波长 750 nm 的信号光, 通过调节由半波片和偏振分束器构成的输出耦合器, 使得 90%的信号光从偏振分束器输出, 剩余的 10%进入反馈回路。由于参量振荡器的重复频率要与泵浦光的重复频率一致, 根据理论公式计算得到所需的单模光纤长度约为 102 m。由于长延时光纤引入的群速度色散, 反馈信号的脉冲宽度会被显著展宽, 导致其脉宽明显大于泵浦光的脉宽。因此, 仅有部分反馈脉冲能够在时域上与入射的泵浦脉冲实现重叠, 这一现象为生成的信号脉冲引入了光谱滤波和时间窄化效应。基于此机制, 通过精确调节可调延时装置的光程, 在泵浦光波长不变的情况下可以实现对信号光波长的连续调谐。根据 OPG 下产生信号光的光谱宽度、延时光纤的长度以及色散系数, 理论计算得出反馈信号经过延时光纤后脉宽展宽至约 27 ps, 如图 3(a)所示, 理论计算还揭示了波长可调谐性与延迟距离的关系。如图 3(b)所示, 实验中通过移动可调延时装置 8 mm, 实现了信号光中心波长在 748.5~753.1 nm 范围内调谐, 光谱宽度为 1.43~2.21 nm, 输出功率为 3.1~5.6 mW。与 OPG 下直接输出的信号光相比, OPO 系统输出的信号光具有更窄的光谱宽度和更高的输出功率, 进一步验证了该系统的优化效果。

若泵浦振荡器的重复频率为 f , 选频模块中的选频比为 N , 选频后的泵浦光重频为 f/N , 通过调整参

量振荡器的腔长,使参量振荡器的本征重频也为 f/N 。当泵浦振荡器腔长改变 dL 、重频调节量为 df 时,经选频模块后,泵浦光重频变化量为 df/N ,等效于参量振荡器的重频变化量 df/N ,对应其腔长改变 $N \times dL$ 。因低重频光学参量振荡器腔长改变会引起输出波长变化,故改变泵浦振荡器重频,可使参量振荡器腔长呈现 N 倍变化,从而达到提高参量振荡器波长调谐速度的目的。实验中利用声光调制器的频率选择功能,将进入参量振荡器的 1030 nm 泵浦光重复频率设置为 2 MHz,从而使泵浦振荡器与参量振荡器的重复频率比例达到 10:1。如图 3(c)所示,当调节泵浦振荡器的腔长时,泵浦振荡器的重复频率会随之改变,进而导致参量振荡器的重复频率也相应变化。因此,通过调节泵浦振荡器的腔长,就等效于成比例的改变参量振荡器的腔长,即可实现信号光波长的调谐。如图 3(d)所示,实验中通过改变泵浦振荡器的腔长 0.8 mm,等效于改变参量振荡器的腔长 8 mm,实现了信号光中心波长在 748.3~754.9 nm 范围内调谐,光谱宽度为 1.20~2.51 nm,输出功率为 3.2~5.8 mW。与传统 OPO 的调谐方法相比,尽管本方法在波长调谐范围上与之相近,但在调谐速度上显著提升。

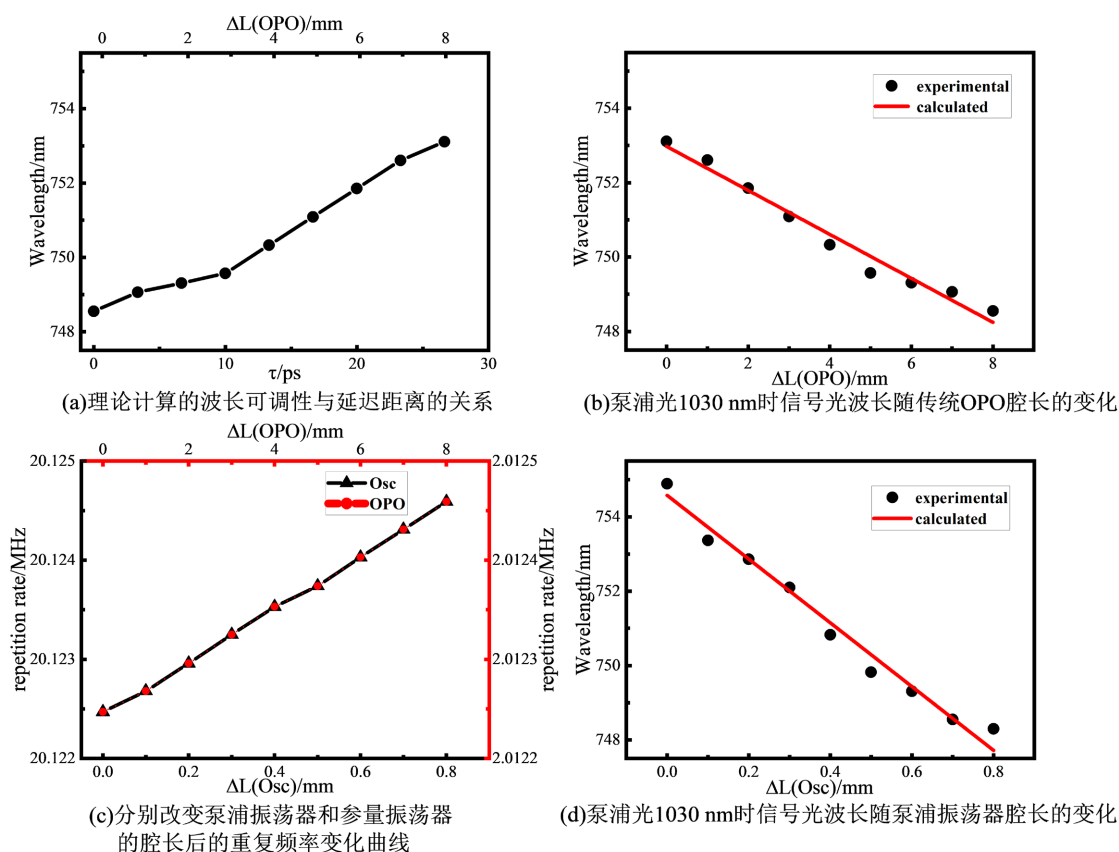


Figure 3. The variation of signal wavelength with traditional OPO cavity length and pump oscillator cavity length at a pump light wavelength of 1030 nm

图 3. 泵浦光波长 1030 nm 时信号光波长随传统 OPO 腔长与泵浦振荡器腔长的变化

将泵浦光波长调整到 1035 nm,如图 4(a)所示,传统 OPO 需要改变 12 mm 的腔长才能使信号光波长在 768.3~771.2 nm 范围内调谐。如图 4(b)所示,通过本实验方法,仅需调节泵浦振荡器的腔长 1.2 mm,即可实现信号光波长在 768.3~771.3 nm 范围内调谐。

进一步将泵浦光波长调整到 1040 nm,如图 4(c)所示,传统 OPO 需要改变 12 mm 的腔长才能使信号光波长在 787.5~789.3 nm 范围内调谐。如图 4(d)所示,通过本实验方法,仅需调节泵浦振荡器的腔长 1.2

mm, 即可实现信号光波长在 787.4~789.2 nm 范围内调谐。这一结果表明, 该方法对于不同的泵浦波长均具有普适性, 都能够通过调节泵浦振荡器的腔长实现信号光波长的调谐, 同时提升了调谐的便捷性和速度。

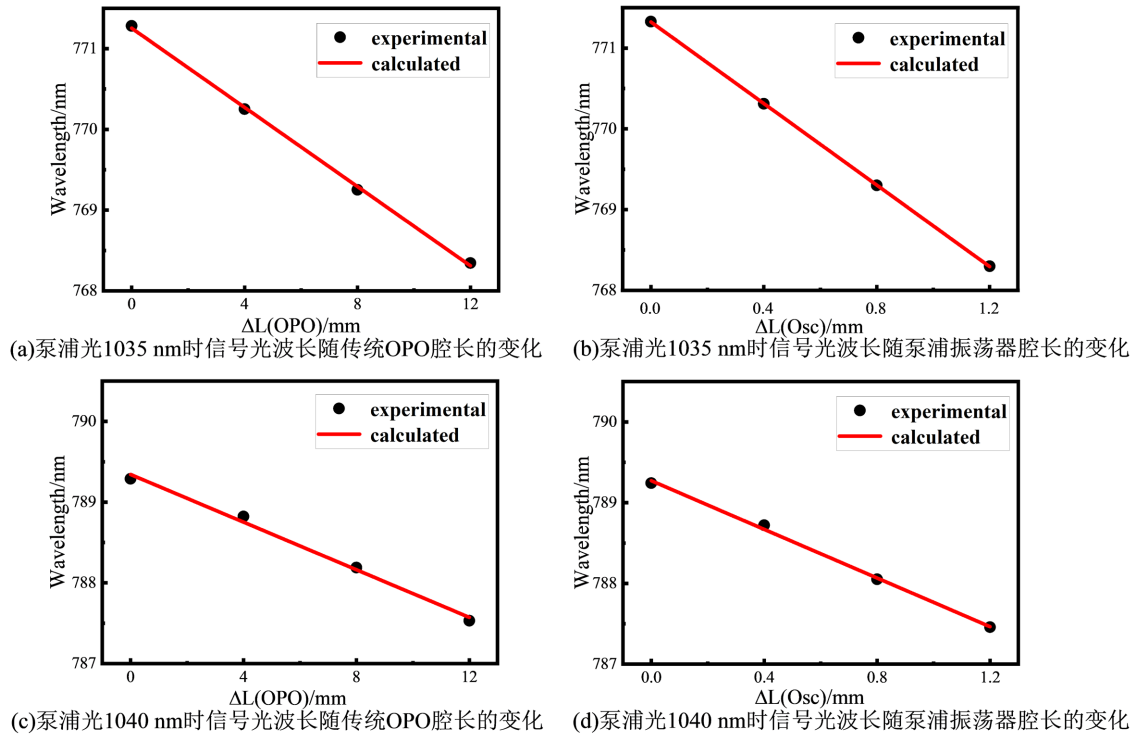


Figure 4. Comparison of signal wavelength with traditional OPO cavity length and pump oscillator cavity length at pump light wavelengths of 1035 nm and 1040 nm, respectively

图 4. 泵浦光波长分别在 1035 nm 和 1040 nm 时信号光波长随传统 OPO 腔长与泵浦振荡器腔长的对比

4. 结论

本文设计并搭建了一种可调谐光纤参量振荡器, 提出了一种新颖的信号光波长调谐方法。重点描述了泵浦光波长为 1030 nm 时, 得益于选频模块所构建起的泵浦振荡器重频与参量振荡器重频间的特定倍数关系, 仅通过泵浦振荡器重频的改变, 无需对光学参量振荡器内器件的角度等其他复杂因素进行调整, 即可实现参量振荡器输出信号光波长在 748.3~754.9 nm 范围内调谐, 输出功率在 3.2~5.8 mW。该方法在泵浦光波长分别调至 1035 nm 和 1040 nm 时同样适用, 展现了良好的通用性。该方法提供了一种波长调谐的新思路, 相较于传统方法能够更快地实现信号光输出波长的调谐, 具有在快速调谐光纤参量振荡器中应用的潜力。

基金项目

国家自然科学基金面上项目(12374402)、上海浦江人才计划资助。

参考文献

- [1] Xu, C. and Wise, F.W. (2013) Recent Advances in Fibre Lasers for Nonlinear Microscopy. *Nature Photonics*, 7, 875-882. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.284>
- [2] Camp Jr, C.H. and Cicerone, M.T. (2015) Chemically Sensitive Bioimaging with Coherent Raman Scattering. *Nature*

- Photonics*, **9**, 295-305. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.60>
- [3] Kong, C., Pilger, C., Kunisch, M., Förster, C., Schulte am Esch, J. and Huser, T. (2023) Hyperspectral Coherent Raman Scattering (CRS) Microscopy Based on a Rapidly Tunable and Environmentally Stable Fiber Laser. *Laser & Photonics Reviews*, **17**, Article 2300521. <https://doi.org/10.1002/lpor.202300521>
- [4] 李姿霖, 李少伟, 张思鹭, 等. 相干拉曼散射显微技术及其在生物医学领域的应用[J]. 中国激光, 2020, 47(2): 81-91.
- [5] Cheng, J. and Xie, X.S. (2015) Vibrational Spectroscopic Imaging of Living Systems: An Emerging Platform for Biology and Medicine. *Science*, **350**, aaa8870. <https://doi.org/10.1126/science.aaa8870>
- [6] 郑世凯, 杨康文, 敖建鹏, 等. 光纤式相干拉曼散射成像光源研究进展[J]. 中国激光, 2019, 46(5): 97-107.
- [7] Chemnitz, M., Baumgartl, M., Meyer, T., Jauregui, C., Dietzek, B., Popp, J., *et al.* (2012) Widely Tuneable Fiber Optical Parametric Amplifier for Coherent Anti-Stokes Raman Scattering Microscopy. *Optics Express*, **20**, 26583-26595. <https://doi.org/10.1364/oe.20.026583>
- [8] Gottschall, T., Meyer, T., Baumgartl, M., Dietzek, B., Popp, J., Limpert, J., *et al.* (2014) Fiber-Based Optical Parametric Oscillator for High Resolution Coherent Anti-Stokes Raman Scattering (CARS) Microscopy. *Optics Express*, **22**, 21921-21928. <https://doi.org/10.1364/oe.22.021921>
- [9] Sharping, J.E. (2008) Microstructure Fiber Based Optical Parametric Oscillators. *Journal of Lightwave Technology*, **26**, 2184-2191. <https://doi.org/10.1109/jlt.2008.923274>
- [10] Radic, S. (2008) Parametric Amplification and Processing in Optical Fibers. *Laser & Photonics Reviews*, **2**, 498-513. <https://doi.org/10.1002/lpor.200810049>
- [11] Gottschall, T., Baumgartl, M., Sagnier, A., Rothhardt, J., Jauregui, C., Limpert, J., *et al.* (2012) Fiber-Based Source for Multiplex-CARS Microscopy Based on Degenerate Four-Wave Mixing. *Optics Express*, **20**, 12004-12013. <https://doi.org/10.1364/oe.20.012004>
- [12] Yuan, J., Zhou, G., Xia, C., Sang, X., Li, F., Yu, C., *et al.* (2016) Degenerate Four-Wave Mixing-Based Light Source for CARS Microspectroscopy. *IEEE Photonics Technology Letters*, **28**, 763-766. <https://doi.org/10.1109/lpt.2015.2513425>
- [13] Baumgartl, M., Chemnitz, M., Jauregui, C., Meyer, T., Dietzek, B., Popp, J., *et al.* (2012) All-Fiber Laser Source for CARS Microscopy Based on Fiber Optical Parametric Frequency Conversion. *Optics Express*, **20**, 4484-4493. <https://doi.org/10.1364/oe.20.004484>
- [14] Brinkmann, M., Janfrüchte, S., Hellwig, T., Dobner, S. and Fallnich, C. (2016) Electronically and Rapidly Tunable Fiber-Integrable Optical Parametric Oscillator for Nonlinear Microscopy. *Optics Letters*, **41**, 2193-2196. <https://doi.org/10.1364/ol.41.002193>
- [15] Yang, K., Zheng, S., Wu, Y., Ye, P., Huang, K., Hao, Q., *et al.* (2018) Low-Repetition-Rate All-Fiber Integrated Optical Parametric Oscillator for Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy. *Optics Express*, **26**, 17519-17528. <https://doi.org/10.1364/oe.26.017519>
- [16] Takahashi, S., Shou, J., Dai, G. and Ozeki, Y. (2022) Fiber Optical Parametric Oscillator with Wide Tuning Range and Fixed Repetition Rate. *IEEE Photonics Technology Letters*, **34**, 1293-1296. <https://doi.org/10.1109/lpt.2022.3212706>