

自注入锁定激光器的频率热调谐方法改进

王宇欣 钟山 梁伟 赵峰 詹志明 阎柏屹 康松柏

Improved method for frequency-thermal tuning of a self-injection locked laser

WANG Yu-xin, ZHONG Shan, LIANG Wei, ZHAO Feng, ZHAN Zhi-ming, YAN Bai-yi, KANG Song-bai

引用本文:

王宇欣, 钟山, 梁伟, 赵峰, 詹志明, 阎柏屹, 康松柏. 自注入锁定激光器的频率热调谐方法改进[J]. *中国光学*, 2024, 17(6): 1265–1271. doi: 10.37188/CO.2024–0025

WANG Yu-xin, ZHONG Shan, LIANG Wei, ZHAO Feng, ZHAN Zhi-ming, YAN Bai-yi, KANG Song-bai. Improved method for frequency-thermal tuning of a self-injection locked laser[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1265-1271. doi: 10.37188/CO.2024-0025

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024–0025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于量子传感的窄线宽无磁垂直腔面发射激光器

Narrow line width and magnetism-free vertical-cavity surface-emitting lasers for quantum sensing

中国光学 (中英文). 2022, 15(5): 1038 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0135>

窄线宽1064 nm光纤激光泵浦高效率中红外3.8 μm MgO:PPLN光参量振荡器

High efficiency mid-infrared 3.8 μm MgO:PPLN optical parametric oscillator pumped by narrow linewidth 1064 nm fiber laser

中国光学 (中英文). 2021, 14(2): 361 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0169>

注入功率比可调控的双泵浦复合腔501 nm青光激光器

Double pumped composite cavity 501 nm cyan laser with tunable injection power ratio

中国光学 (中英文). 2021, 14(2): 329 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0161>

紧凑型波长自动调谐脉冲CO₂激光器

Compact pulsed CO₂ laser with wavelength automatic tuning

中国光学 (中英文). 2022, 15(5): 1007 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0107>

基于布里渊光纤振荡器的可调谐窄带微波光子滤波器研究

Tunable narrowband microwave photonic filter based on brillouin fiber oscillator

中国光学 (中英文). 2022, 15(4): 660 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0057>

蓝光二极管抽运Pr : YLF腔内倍频连续深紫外激光器

Continuous deep ultraviolet laser by intracavity frequency doubling of blue laser diode pumped Pr : YLF

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1395 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0077>

文章编号 2097-1842(2024)06-1265-07

自注入锁定激光器的频率热调谐方法改进

王宇欣^{1,2}, 钟山^{1*}, 梁伟^{3*}, 赵峰^{1*}, 詹志明², 阎柏屹^{3,4}, 康松柏¹

(1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 中国科学院原子频标重点实验室,
湖北武汉 430071;

2. 江汉大学人工智能学院, 湖北武汉 430056;

3. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所, 江苏苏州 215123;

4. 西交利物浦大学, 江苏苏州 215123)

摘要: 为了提高自注入锁定激光器的频率连续可调谐范围, 对法布里-珀罗(FP)微腔在频率热调谐过程中注入锁定相位的变化关系进行研究。在传统频率热调谐的基础上, 对自注入锁定激光器频率和相位等参数特性进行研究, 提出一种在频率热调谐时加入自注入锁定相位补偿和DFB芯片电流补偿的改进算法, 并在一台基于FP微腔自注入锁定激光器上对此算法进行验证实验。这台激光器的波长为1550 nm, 3 dB线宽为785 Hz, 通过一对加热电阻对FP微腔进行频率热调谐。实验结果表明: 激光器硬件部分未作任何修改的情况下, 改进后的算法在激光器原有驱动控制电路的单片机程序中实现了6 GHz的频率连续调谐范围。该工作为自注入锁定激光器提供一种简单高效且稳定性好的频率调谐方案, 具有较高的实用性和市场前景。

关键词: 激光器; 频率调谐; 自注入; 窄线宽

中图分类号: TN248

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2024-0025

CSTR: 32171.14.CO.2024-0025

Improved method for frequency-thermal tuning of a self-injection locked laser

WANG Yu-xin^{1,2}, ZHONG Shan^{1*}, LIANG Wei^{3*}, ZHAO Feng^{1*},

ZHAN Zhi-ming², YAN Bai-yi^{3,4}, KANG Song-bai¹

(1. Key Laboratory of Atomic Frequency Standards, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. School of Artificial Intelligence, Jiangnan University, Wuhan 430056, China;

3. Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China;

4. Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou 215123, China)

* Corresponding author, E-mail: zhongshan@apm.ac.cn; wliang2019@sinano.ac.cn; zf_lucky@apm.ac.cn

Abstract: In order to expand the continuous tunable range of a self-injection-locked laser frequency, the variation relationship of the injected locking phase of the Fabry-Perot (FP) microcavity during the frequency-

收稿日期: 2024-01-29; 修订日期: 2024-03-06

基金项目: 国家自然科学基金(No. 62075233); 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划(No. YSBR-69)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62075233); CAS Project for Young Scientists in Basic Research (No. YSBR-69)

thermal tuning process is studied. Based on the traditional frequency-thermal tuning methods, we explore the frequency and phase parameter characteristics of a self-injection locked laser. We propose an improved algorithm which adds self-injection locking phase compensation and DFB chip current compensation during frequency-thermal tuning methods. Experimental validation of this algorithm is conducted on a FP micro-cavity self-injection locked laser. The laser operates at a wavelength of 1550 nm with a 3 dB linewidth of 785 Hz, achieving frequency-thermal tuning methods of the FP micro-cavity using a pair of heating resistors. The improved algorithm is implemented within the microcontroller program of the laser's original drive control circuit. No modifications are made to the hardware components of the laser. Ultimately, a continuous frequency tuning range of 6 GHz is realized. This work provides a simple, efficient, and stable frequency-tuning solution for self-injection-locked lasers, demonstrating high practicality and promising market prospects.

Key words: lasers; frequency tuning; self-injection locking; narrow linewidth

1 引言

窄线宽和频率可调谐范围是高性能激光器的两大核心指标, 目前已经在相干光通信、光纤传感、量子精密测量、高功率激光器种子源等领域有广泛应用^[1]。为了压窄激光器线宽, 可以采用 (Pound-Drever-Hall) PDH 技术^[2] 或者自注入锁定技术将激光器频率锁定到外部高品质因子 (Q) 光学腔中。相比于自注入锁定技术, PDH 锁频技术需要复杂的伺服锁定系统和较大体积的光路系统^[3], 因此在体积、功耗和锁定稳定性等多项指标上, 基于自注入锁定技术的激光器具有绝对优势。自注入锁定激光器的光源一般采用如分布式反馈结构 (distributed feedback structure, DFB) 或者分布式布拉格反射结构 (distributed Bragg reflector, DBR) 的半导体激光芯片, 因此还具有波长覆盖范围广的优势^[4-5]。这在量子物理这类对于特定波长和线宽指标均要求极高的领域具有不可替代的优势。然而, 自注入锁定激光器同时具有半导体激光芯片内腔、高 Q 光学微腔和这两者构建的外腔反馈, 存在多个谐振腔频率和相位协同工作的问题^[6], 因此基于自注入锁定的窄线宽激光器大范围频率调谐是目前的难点。

目前商用自注入锁定激光器用到的外腔大体有片上微环^[7-8] 和晶体腔^[9-10] 两种方案。片上微环的外腔具有集成度高, 光路紧凑的特点, 因此频率调谐过程中相位变化相对较小, 可以实现更大的频率调谐范围^[11-12]。另外, 片上微环腔模式干净, 自由光谱范围 (free spectral range, FSR) 大, 光源

可以采用增益芯片 (GC), 配合双腔方案甚至可以实现几十纳米的波长调谐范围^[13-16]。晶体腔最大的优势在于 Q 值更高^[17], 可以更大程度地压窄线宽, OEwaves 公司推出的基于回音壁外腔的自注入锁定商用激光器本征线宽达到 Hz 量级。中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所梁伟团队研制的基于 FP 微腔自注入反馈激光器线宽达到亚 Hz 量级^[17], 但是相较于片上微环, 外腔自注入锁定激光器的反馈光程更长一些, 因此频率调谐范围受限。

为了解决晶体外腔自注入锁定激光器频率调谐范围小这一问题, 本文研究了频率热调谐过程中注入锁定相位的变化情况, 在锁定程序中加入了相位补偿算法, 同时在热调谐过程中补偿 DFB 芯片的工作电流, 让 DFB 的激光频率和 FP 微腔的中心频率一致, 进一步增大了频率调谐范围, 最终实现了 6 GHz 的频率连续可调范围。

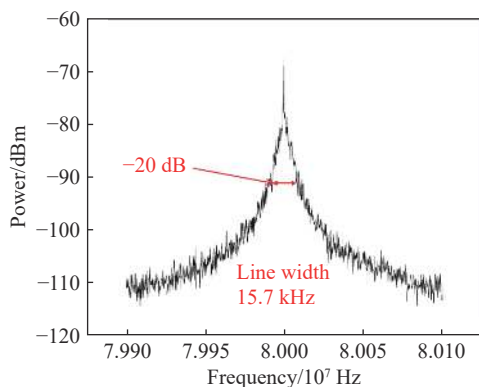
2 实验原理及装置

2.1 自注入锁定激光器工作原理

本实验所用激光器由武汉微莱激光科技有限公司提供, 该激光器如图 1(a) (彩图见期刊电子版) 所示。激光器部分封装在标准蝶形管壳里, 配上驱动电路, 整体安装在一个 101.6 mm × 57.15 mm × 13.97 mm 的金属外壳里, 5 V–24 V 宽电压供电。采用 50 km 光纤自延时外差法测量这台激光器线宽, 结果如图 1(b) (彩图见期刊电子版) 所示。其 20 dB 线宽为 15.7 kHz, 对应的 3 dB 线宽为 0.785 kHz^[18]。



(a) F-P微腔自注入锁定窄线宽激光器模块
(a) F-P micro-cavity self-injection locked narrow-linewidth laser module



(b) 50 km光纤自延时外差法测量结果
(b) Measurement results by the 50-km fiber self-delayed heterodyne method

图1 激光器实物图及线宽测试图

Fig. 1 Physical image of laser and linewidth test diagram

激光器的内部光路原理图如图2所示, DFB芯片两端出射, 正向出射光首先经过透镜(lens1)准直, 然后经过两个反射镜 RM1 和 RM2 进入隔离器, 最后耦合进光纤输出; 背向出射时, 出光首先经过透镜(lens2)进行准直, 然后经过一个相位片后耦合进一个实心 FP 微腔。实心 FP 微腔入射端面是平面, 出射端是球面, 两个面均镀有高反膜。一共有 4 个出射端, 将其中一个出射端放置一个光电探测器(PD), 用于监测 FP 腔的耦合状态, 另一个原路返回的出射端激光反馈进入到 DFB 芯片中, 在 DFB 芯片内部进行模式竞争, 当回注光强达到一定阈值时, 即可实现对 DFB 芯片自发辐射的抑制, 最终实现窄线宽激光输出。剩下的两路出射端没有使用。自注入锁定后, 激光器的频率锁定在 FP 微腔的谐振频率上, 线宽压窄系数为^[19]:

$$\frac{\delta\omega}{\delta\omega_{\text{free}}} \approx \frac{Q_d^2}{Q^2} \times \frac{1}{16\Gamma_m^2(1+\alpha_g^2)}, \quad (1)$$

式中: $\delta\omega$ 和 $\delta\omega_{\text{free}}$ 分别是自注入锁定后和激光器自由运转状态下的激光线宽; Q_d 和 Q 分别为 DFB 芯片和 FP 微腔的品质因子; Γ_m 是回注光效率, 约等于反馈光强和 DFB 芯片出光光强的比值; α_g 是反馈光注入 DFB 芯片的相位-振幅耦合系数。

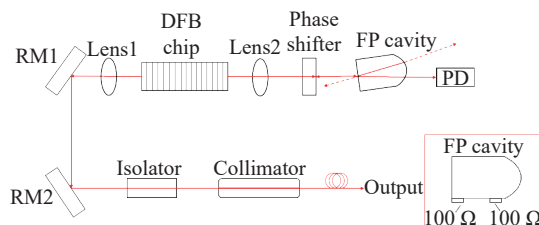


图2 激光器光路示意图

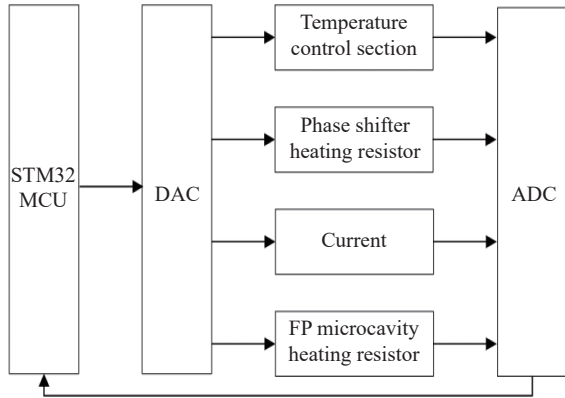
Fig. 2 Schematic diagram of the laser optical path

2.2 激光器驱动及控制

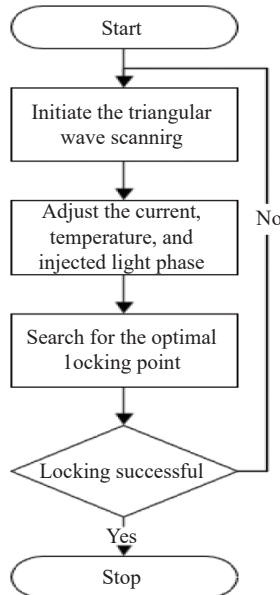
激光器驱动电路主要包括了单片机控制部分、温控部分、电流控制部分、相位片加热电阻和 FP 微腔加热电阻, 图3(a)为驱动电路的原理框图。这台激光器采用 STM32F103RCT6 单片机作为驱动的核心控制元件。它通过 DAC 控制驱动中的温度、激光电流和两个加热用电阻的电压值。注入光相位调节是通过电阻对相位片进行加热, 使其温度发生变化由此引起相位片折射率变化, 从而使注入光相位随之改变。激光频率的调谐是利用另一对电阻对 FP 微腔进行加热(如图2右下所示), 进而改变 FP 腔的共振频率, 实现激光频率的热调谐。ADC 会对温控, 激光电流以及电阻两端的电压值进行实时监控, 并将采集到的数值发送到单片机, 然后通过单片机的自动锁定程序优化激光器的温度、电流、注入相位等锁定参数完成自注入锁定, 锁定流程图如图3(b)所示。

优化锁定参数的目的是为了寻找最佳锁定点, 最佳锁定点要求 DFB 芯片的中心频率和 FP 微腔的中心频率一致, 并且注入光相位与 DFB 芯片内的激光相位相匹配^[19-20]。自动算法的参数优化过程如下: 首先, 利用 PD 采集到的数值判断自注入波形峰值的位置, 然后通过调节温度和电流将峰值位置移动到激光电流扫描的中间区域; 再调节注入相位改变自注入波形的形状, 在改变注入相位的同时峰值位置也将发生改变, 从而导致输出波形形状发生改变。因此上述两个步骤需要重复多次, 直至达到下位机设定的判定条件后, 将三角波扫描幅值减小至 0, 进入锁定状态。如果锁定失败, 则重新开启驱动电流扫描, 重复上述过程。

整个过程从开机到完全锁定大约在 1 分钟左右, 一次性锁定成功率在 95% 以上, 从 PD 的采集数据可以判断锁定点在 FP 微腔的共振峰值附近。



(a) 驱动电路的原理框图
(a) Schematic diagram of the drive circuit



(b) 控制流程图
(b) Control flowchart

图 3 驱动电路及控制算法

Fig. 3 Drive circuit and control algorithm

2.3 基于热调的相位补偿算法

调节 FP 微腔加热电阻电压, 将电压值从 0 增加到 3 V, 再从 3 V 减小到 0, 用波长计 (Bristol 671B) 对激光器频率变化进行测量, 结果如图 4 所示。由图 4 可知, 在激光器锁定状态下, 只调节 FP 微腔加热电阻两端的电压值, 激光器容易发生跳模现象, 且频率连续可调谐范围小于 3 GHz。

在 DFB 芯片进行电流扫描的情况下观察自注入锁定波形, 只调节 FP 微腔加热电阻两端电压。图 5(a) (彩图见期刊电子版) 为 FP 微腔加热

电阻两端电压为 2 V 时对应的自注入波形状态。可以看到自注入波形有很明显的不对称性^[21]。图 5(b) (彩图见期刊电子版) 为 FP 微腔加热电阻两端电压为 3 V 时的自注入波形状态。通过对比可知, 只改变 FP 微腔加热电阻两端电压会改变 FP 微腔的共振频率, 进而导致回注光的相位发生改变。频率调谐引入的相位变化如公式 (2) 所示^[19]:

$$\Delta\Phi = \Delta\omega_{\text{FP}}\tau_s < \frac{\pi}{4}, \quad (2)$$

式中 $\Delta\omega_{\text{FP}}$ 是热调电阻加热引起的 FP 微腔共振频率的变化量, τ_s 是激光从 DFB 芯片出射到 FP 微腔来回所用时间, $\Delta\Phi$ 是频率调谐引起的注入锁定相位的变化量。当频率变化引入的回注光相位变化偏离初始最佳锁定点达到一定程度时, 会导致脱锁。

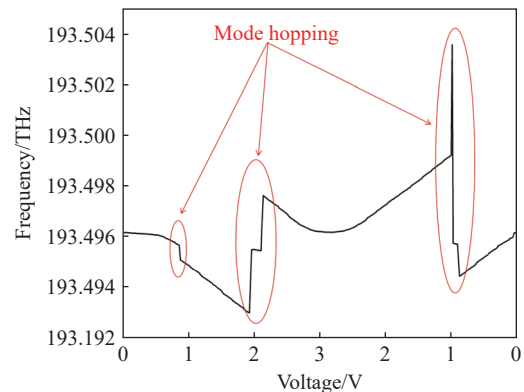


图 4 调节 FP 微腔加热电阻的频率调谐范围

Fig. 4 Frequency tuning range by adjusting the heating resistor of the FP microcavity

根据公式 (2) 的描述, 为了增大热调谐的可连续调谐频率范围, 利用注入光相位来补偿频率调谐时引入的相位变化, 当调整 FP 微腔加热电阻的电压时, 相位片加热电阻的电压也随之改变。为了探究两个电阻电压的函数关系, 通过 PD 探测到在电流扫描时激光器自注入波形的变化。从 0 至 3 V 的改变 FP 微腔加热电阻的电压后, 调节相位片加热电阻的电压, 使得激光器的自注入波形与未调节 FP 微腔加热电阻电压时一致, 记录相位片加热电阻的电压值和 FP 微腔加热电阻的电压值, 结果如图 6 所示。由图 6 可以发现, FP 微腔加热电阻电压的平方和调节相位片加热电阻的电压的平方符合线性关系。二者关系为:

$$y = 0.48x + 0.66 \quad (3)$$

x 为用于 FP 微腔加热电阻两端电压值的平方, y 为用于相位片加热电阻两端电压值的平方。

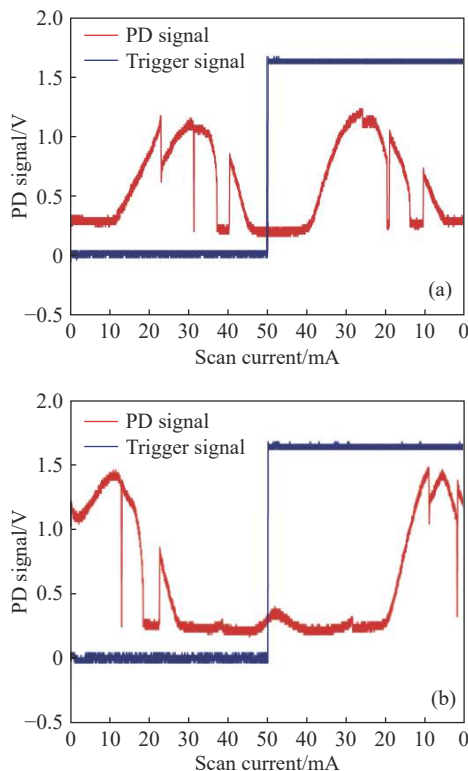


图 5 FP 微腔加热电阻在不同电压下的波形状态。(a) 电压为 2 V; (b) 电压为 3 V

Fig. 5 Waveform states of the heating resistor of the FP microcavity at different voltages. (a) 2 V; (3) 3 V

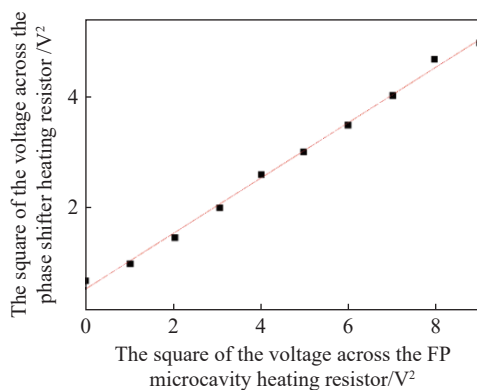


图 6 两个相位之间的线性关系

Fig. 6 Linear relationship between two phases

2.4 基于热调的电流补偿算法

加热电阻改变了 FP 微腔的频率, 通过相位补偿后基本能够保证自注入波形一致, 但是 DFB 的输出频率没有改变, 这会导致锁定点偏移最佳锁定点。更进一步, 当频率调谐较大, 超出自注入锁定范围时, 会导致自注入锁定失锁。因此, 为了保证激光器有更大的热调谐范围和工作在最佳锁

定点附近, 还需要加入电流补偿。

自注入锁定范围如式(4)所示^[19]:

$$\frac{\Delta\omega_{\text{lock}}}{\omega} \approx \sqrt{1 + \alpha_g^2} \frac{\Gamma_m}{Q_d}, \quad (4)$$

式中: ω 是激光器的工作频率, $\Delta\omega_{\text{lock}}$ 是自注入锁定范围; Γ_m 是回注光效率, 约等于反馈光强和DFB芯片出光光强的比值。

为了进一步增大频率调谐范围, 在热调谐的同时在单片机程序中还加入了电流调整机制。这个激光器所用DFB芯片腔长为 600 μm , 电流系数大概是 300 MHz/mA, 可得出 FP 微腔的电压频率调谐系数大概为 2.2 GHz/V。因此, 在调整 FP 微腔电压进行频率热调时, 对应的电流补偿系数为 7.3 mA/V。

3 频率调谐结果测试

3.1 基于热调的相位补偿算法测试结果

在调节 FP 微腔加热电阻两端电压时, 单片机程序都会按照公式(3)中的系数对相位控制电压进行自动补偿。

添加相位补偿算法后, 利用波长对激光器的频率调谐特性进行多次测试, 结果如图 7 所示, 可见, 该激光器基于热调谐的频率最大可连续调谐范围已经增大到了 4.7 GHz, 较未进行相位补偿时提高了 1.5 倍以上。由此可见, 采用相位补偿方法后频率调谐特性有明显改善。

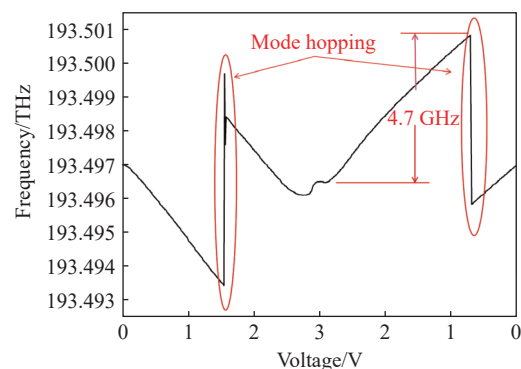


图 7 相位补偿后的频率调谐范围

Fig. 7 Frequency tuning range after phase compensation

3.2 基于热调的电流补偿算法测试结果

在调节 FP 微腔加热电阻两端电压时, 程序都会按照 7.3 mA/V 的系数对电流进行自动补偿, 配合 3.1 小节中的相位补偿, 以保证频率调谐过

程中锁定点在最佳锁定点附近。

加入电流补偿算法后,通过波长计测试基于热调谐的可连续调谐的频率范围,如图 8 所示。由图 8 可知,在 0~3 V 内连续进行多次热调谐的过程中没有发生跳模的情况,且可连续调谐的频率范围增加到了 6 GHz。

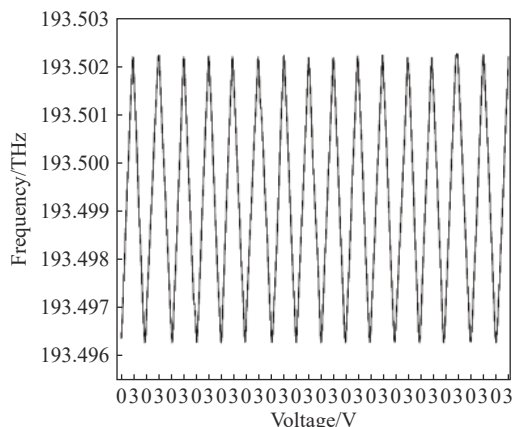


图 8 电流补偿后的频率调谐范围

Fig. 8 Frequency tuning range after current compensation

4 结 论

本文通过热调谐方法实现了自注入锁定激光器的频率连续可调,此外,还对相位补偿和电流补偿算法进行改进。结果显示,改进后的算法使基于 FP 微腔自注入锁定的窄线宽激光器的频率可调谐范围增大至 6 GHz,且可多次进行连续调谐。对比改进前算法,激光器连续可调谐的频率范围增大了 2 倍以上,同时从无法进行连续调谐变成了可进行多次连续调谐。根据调谐频率和加热电阻的平方呈线性关系这一特性,后续若将用于热调谐的电阻两端的最大电压值从 3 V 增加到 4 V,激光器连续可调谐的频率范围有望增大至 10 GHz 以上。本文提出的这种针对自注入锁定激光器的频率调谐算法对于改进激光器的频率调谐特性和调频过程中提升激光器锁定的稳定性都具有重要参考价值。

参考文献:

- [1] 孙仕豪,郑也,于森,等. 基于多纵模振荡种子源的高功率窄线宽光纤激光器关键技术分析及研究现状[J]. *中国光学(中英文)*, 2024, 17(1): 38-51.
SUN SH H, ZHENG Y, YU M, *et al.*. Key technology analysis and research progress of high-power narrow linewidth fiber laser based on the multi-longitudinal-mode oscillator seed source[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(1): 38-51. (in Chinese).
- [2] DREVER R W P, HALL J L, KOWALSKI F V, *et al.*. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. *Applied Physics B*, 1983, 31(2): 97-105.
- [3] LUDLOW A D, HUANG X, NOTCUTT M, *et al.*. Compact, thermal-noise-limited optical cavity for diode laser stabilization at 1×10^{-15} [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(6): 641-643.
- [4] SAVCHENKOV A A, CHRISTENSEN J E, HUCUL D, *et al.*. Application of a self-injection locked cyan laser for barium ion cooling and spectroscopy [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 16494.
- [5] LAI Y H, ELIYAHU D, GANJI S, *et al.*. 780 nm narrow-linewidth self-injection-locked WGM lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11266: 112660O.
- [6] NUNZI CONTI G, BARUCCI A, BERNESCHI S, *et al.*. Coupling approaches and new geometries in whispering-gallery-mode resonators [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8236: 82360V.
- [7] LI J CH, ZHANG B Y, YANG S G, *et al.*. Robust hybrid laser linewidth reduction using Si_3N_4 -based subwavelength hole defect assisted microring reflector [J]. *Photonics Research*, 2021, 9(4): 558-566.
- [8] 杜悦宁,陈超,秦莉,等. 硅光子芯片外腔窄线宽半导体激光器[J]. *中国光学*, 2019, 12(2): 229-241.
DU Y N, CHEN CH, QIN L, *et al.*. Narrow linewidth external cavity semiconductor laser based on silicon photonic chip [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 229-241. (in Chinese).
- [9] ZHAO Y, LI Y, WANG Q, *et al.*. 100-Hz Linewidth diode laser with external optical feedback [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(20): 1795-1798.
- [10] 刘云凤,梁伟. 自注入锁定外腔超窄线宽半导体激光[J]. *中国激光*, 2021, 48(17): 1715001.
LIU Y F, LIANG W. Compact narrow linewidth external cavity semiconductor laser realized by self-injection locking to Fabry-Perot cavity [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(17): 1715001. (in Chinese).
- [11] SU Q SH, WEI F, CHEN CH, *et al.*. A self-injection locked laser based on high-Q micro-ring resonator with adjustable

- feedback[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(21): 6756-6763.
- [12] ZHANG CH W, XU CH D, JIN Y, *et al.*. Narrow linewidth semiconductor laser with a multi-period-delayed feedback photonic circuit[J]. *Optics Express*, 2022, 30(9): 15796-15806.
- [13] HULME J C, DOYLEND J K, BOWERS J E. Widely tunable Vernier ring laser on hybrid silicon[J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 19718-19722.
- [14] GUAN H, NOVACK A, GALFSKY T, *et al.*. Widely-tunable, narrow-linewidth III-V/silicon hybrid external-cavity laser for coherent communication[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 7920-7933.
- [15] REN M, CAI H, TAO J F, *et al.*. A tunable laser using loop-back external cavity based on double ring resonators[C]. *Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, IEEE, 2013: 1424-1427.
- [16] REN M, CAI H, TSAI J M, *et al.*. A tunable laser using double-ring resonator external cavity via free-carrier dispersion effect[C]. *16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, IEEE, 2011: 1504-1507.
- [17] LIANG W, LIU Y F. Compact sub-hertz linewidth laser enabled by self-injection lock to a sub-milliliter FP cavity[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(5): 1323-1326.
- [18] PENG Y. A novel scheme for hundred-hertz linewidth measurements with the self-heterodyne method[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(8): 084208.
- [19] KONDRATIEV N M, LOBANOV V E, CHERENKOV A V, *et al.*. Self-injection locking of a laser diode to a high-Q WGM microresonator[J]. *Optics Express*, 2017, 25(23): 28167-28178.
- [20] GALIEV R R, KONDRATIEV N M, LOBANOV V E, *et al.*. Optimization of laser stabilization via self-injection locking to a whispering-gallery-mode microresonator[J]. *Physical Review Applied*, 2020, 14(1): 014036.
- [21] KONDRATIEV N M, LOBANOV V E, SHITIKOV A E, *et al.*. Recent advances in laser self-injection locking to high-Q microresonators[J]. *Frontiers of Physics*, 2023, 18(2): 21305.

作者简介:



王宇欣(1995—),女,辽宁抚顺人,硕士研究生,2017年于沈阳工业大学获得学士学位,主要从事窄线宽激光器方面的研究。E-mail: 183160683@qq.com



钟山(1982—),男,湖北武汉人,博士,高级工程师,硕士生导师,2005年、2012年于武汉大学分别获得学士学位、博士学位,主要从事窄线宽激光器,激光锁频,原子干涉仪等方面的研究。E-mail: zhongshan@apm.ac.cn



梁伟(1979—),男,湖南湘乡人,博士,研究员,博士生导师,2001年于清华大学获得学士学位,2008年于美国加州理工获得博士学位,主要从事窄线宽激光器,光学频率梳,光电振荡器方面的研究。E-mail: wliang2019@sinano.ac.cn



赵峰(1979—),男,湖北仙桃人,博士,正高级工程师,博士生导师,2000年于华中科技大学获得学士学位,2007年于中国科学院武汉物理与数学研究所获得博士学位,主要从事原子钟,原子频标方面的研究。E-mail: zf_lucky@apm.ac.cn