

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

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

WANG Yuxin, ZHONG Shan, LIANG Wei, ZHAO Feng, ZHAN Zhiming, YAN Baiyi, KANG Songbai

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*, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2024-0025

WANG Yuxin, ZHONG Shan, LIANG Wei, ZHAO Feng, ZHAN Zhiming, YAN Baiyi, KANG Songbai. Enhanced method for thermal frequency tuning of a self-injection locked laser[J]. *Chinese Optics*, In press. 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(xxxx)x-0001-08

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, 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:目的: 为了提高自注入锁定激光器频率连续可调谐范围, 对 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。方法: 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, 并在一台基于法布里-珀罗 (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。结果: 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, 激光器硬件部分未作任何修改, 最终实现了 6GHz 的频率连续调谐范围。结论: 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

Enhanced method for thermal frequency tuning of an self-injection locked laser

WANG Yuxin^{1,2}, ZHONG Shan¹, LIANG Wei³, ZHAO Feng^{1*}, ZHAN Zhiming²,

YAN Baiyi^{3,4}, KANG Songbai¹

(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, Jianghan University, Wuhan 430056, Hubei, China;

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

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

* Corresponding author, E-mail: zf_lucky@apm.ac.cn

Abstract: Objective: In order to enhance the continuous tunable range of a self-injection-locked laser fre-

收稿日期: 2024-01-29; 修订日期: xxxx-xx-xx

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); 科技创新 2030—“量子通信与量子计算机”重大项目 (No. 2023ZD0301500)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62075233); CAS Project for Young Scientists in Basic Research (No. YSBR-69); Innovation Program for Quantum Science and Technology (No. 2023ZD0301500)

quency, a study is conducted on the variation relationship of the injected locking phase of the FP microcavity during the frequency-thermal tuning process. **Method:** Building upon traditional frequency thermotuning methods, this study explores the characteristics of frequency and phase parameters of a self-injection locked laser. We proposed an improved algorithm that integrates injection locking phase compensation and DFB chip current compensation during frequency thermotuning. Experimental validation of this algorithm was conducted on a Fabry-Perot (FP) micro-cavity self-injection locked laser. The laser operates at a wavelength of 1550nm with a 3dB linewidth of 785Hz, achieving frequency thermotuning of the FP micro-cavity using a pair of heating resistors. **Result:** The enhanced 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, this implementation achieves a continuous frequency tuning range of 6 GHz. **Conclusion:** 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]。为了压窄激光器的线宽, 可以采用 PDH 技术(Pound-Drever-Hall)^[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(DFB)或者分布式布拉格反射结构(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上有片上微环^[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(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 nm 的波长调谐范围^[13-16]; 晶体腔最大的优势在于 Q 值更高^[17], 可以实现更大程度的压窄线宽, OE-Waves 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], 但是反馈光程相较于片上外腔自注入锁定激光器更长一些, 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的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关系, 在锁定程序中加入相位补偿算法, 同时在热调谐过程中补偿 DFB 芯片的工作电流, 让 DFB 的激光频率跟随 FP 微腔的中心频率, 进一步增大了频率调谐范围, 最终实现了 6GHz 的频率连续可调范围。

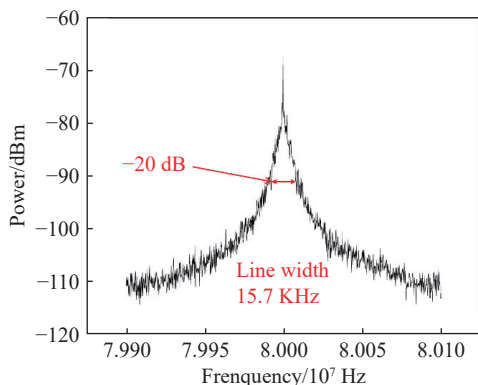
2 实验原理及装置

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)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 101.6×57.15×13.97 mm³ 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)所示, 其 20 dB 线宽 15.7 kHz, 对应 3 dB 线宽为 0.785 kHz^[18]。



(a) F-P微外腔自注入锁定窄线宽激光器模块
(a) F-P external 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 using a 50 km fiber self-delayed heterodyne method

图 1 激光器及线宽测试图

Fig. 1 Laser and Linewidth Test

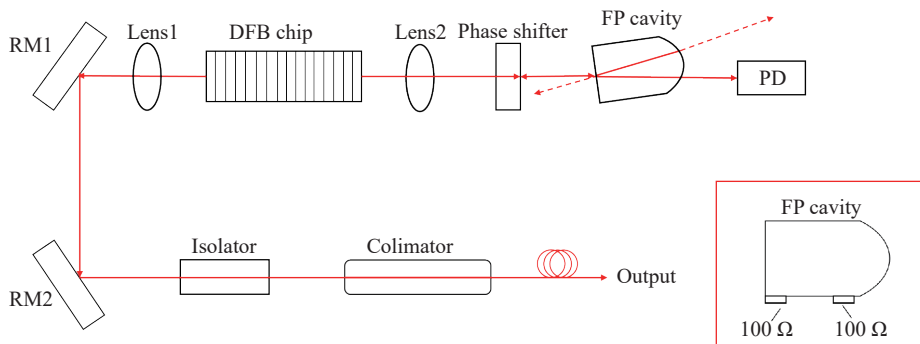


图 2 激光器光路示意图

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

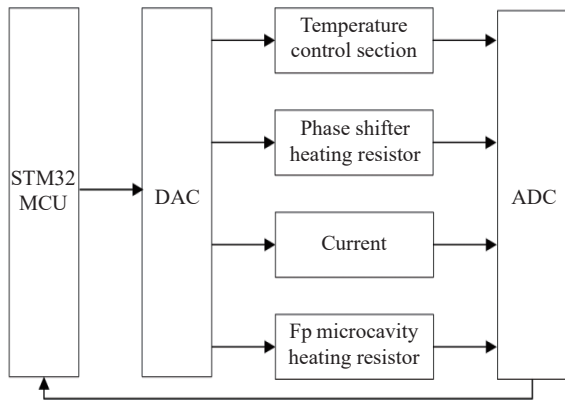
激光器的内部光路原理图如图 2 所示, DFB 芯片双端出射, 正向出射光首先经过透镜(lens1)准直, 然后经过两个反射镜 RM1 和 RM2 后过隔离器, 最后耦合进光纤输出; 背向出射光首先经过透镜(lens2)进行准直, 然后经过一个相位片后耦合进一个实心法布里-珀罗(FP)微腔, 实心 FP 微腔入射端面是平面, 出射端是球面, 两个面镀高反膜, 一共有四个出射端, 其中一个出射端放置一个光电探测器(PD), 用于监测 FP 腔的耦合状态, 一个原路返回的出射端激光反馈进入到 DFB 芯片中, 在 DFB 芯片内部进行模式竞争, 当回注光强达到一定的阈值, 即可实现对 DFB 芯片自发辐射的抑制, 最终实现窄线宽激光输出。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]:

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

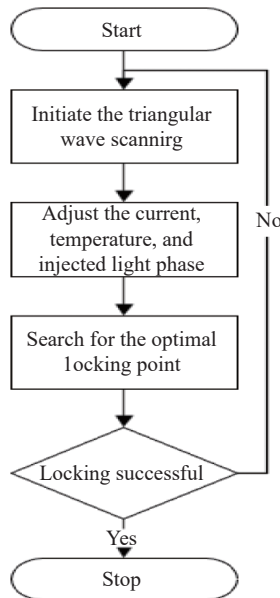
式中: $\delta\omega$ 和 $\delta\omega_{free}$ 分别是自注入锁定后和激光器自由运转状态下的激光线宽; Q_d 和 Q 分别为 DFB 芯片和 FP 微腔的品质因子; Γ_m 是回注光效率, 约等于反馈光强和 DFB 芯片出光光强的比值; α_g 是反馈光注入 DFB 芯片的相位-振幅耦合系数。

框图。这台激光器采用的是 STM32F103RCT6 单片机作为驱动的核心控制元件, 它通过 DAC 控制驱动中的温控、激光电流和两个加热用电阻的电压值。注入光相位的调节是通过电阻对相位片

进行加热,温度变化引起相位片折射率变化,注入光相位随之改变;激光频率的调谐是通过另一对电阻对 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,从而实现激光频率热调谐的目的。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,锁定过程流程图如图 3(b)所示。



(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

其中,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

参数优化过程首先是通过 PD 采集到的数值判断自注入波形峰值的位置,然后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,改变注入相位的同时会改变峰值位置,改变峰值位置也会改变输出波形形状,因此这两个步骤需要重复几次,直至达到下位机设定的判定条件后,减小三角波扫描幅值至 0 进入锁定状态;如果锁定失败,则开始驱动电流扫描,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。

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)对激光器频率变化的测试结果如图 4 所示。由图中可知,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的现象,且频率连续可调谐范围小于 3 GHz。

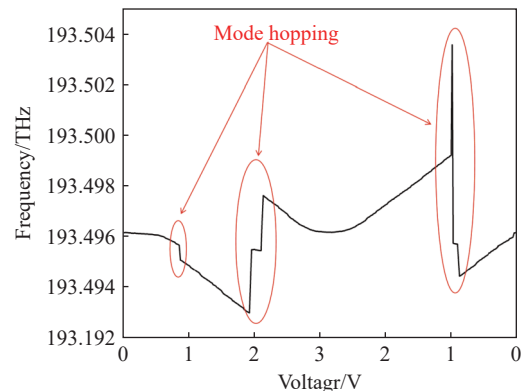


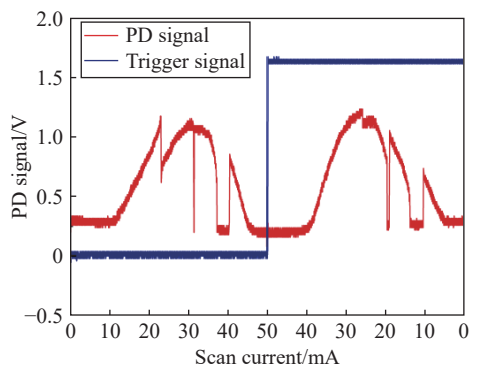
图 4 调节 FP 微腔加热电阻的频率调谐范围

Fig. 4 Frequency Tuning Range by Adjusting the Heating Resistor of the FP Microcavity

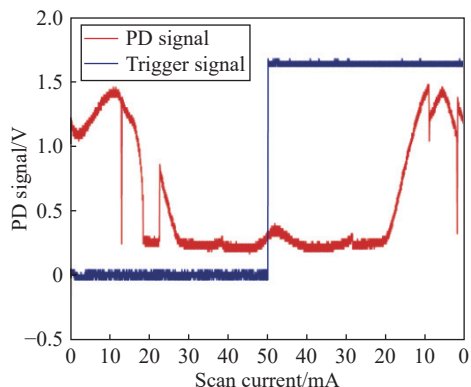
在 DFB 芯片工作电流扫描的情况下观察自注入锁定的波形,只调节 FP 微腔加热电阻两端电压,图 5(a)为 FP 微腔加热电阻两端电压在 2 V 时对应的自注入波形状态,可以看到自注入波形有很明显的不对称性^[21];图 5(b)为用于 FP 微腔加热电阻两端电压在 3 V 时对应的自注入波形状态。通过对比可知,只改变 FP 微腔加热电阻两端电压会改变 FP 微腔的共振频率,进而导致回注光的相位发生改变。频率调谐引入的相位变化如公式(2)所示^[19];

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

式中 $\Delta\omega_{FP}$ 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量时, 会导致脱锁。



(a) FP微腔加热电阻电压在2 V时对应的波形状态
(a) Waveform state corresponding to the FP microcavity heating resistor voltage at 2 V



(b) FP微腔加热电阻电压在3 V时对应的波形状态
(b) Waveform state corresponding to the FP microcavity heating resistor voltage at 3 V

图 5 FP 微腔加热电阻电压在不同电压下的波形状态。

Fig. 5 Waveform states of the FP microcavity heating resistor voltage at different voltages.

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, 我们利用注入光相位来补偿频率调谐时引入的相位变化, 当 FP 微腔加热电阻的电压进行调整时, 相位片加热电阻的电压也随之进行调整。为了探究两个电阻电压的函数关系, 我们通过 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。由图中可以发现, 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。

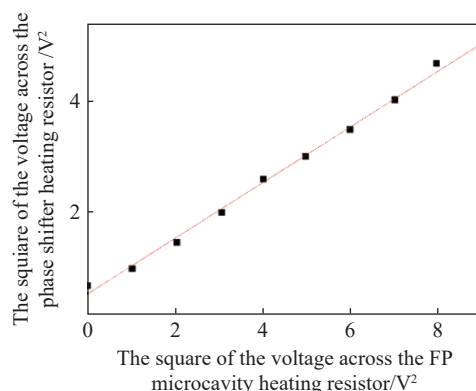


图 6 两个相位之间的线性关系

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。

自注入锁定范围如公式(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; Q_d 为 DFB 芯片的品质因子; 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。

为了进一步增大频率调谐范围, 在热调谐的同时我们在单片机程序中还加入了电流调整机制。这只激光器所用 DFB 芯片腔长 600 μm , 电流系数大概是 300 MHz/mA, FP 微腔的电压频率调谐系数由图 7 可以得出大概为 2.2 GHz/V, 因

此我们在调整 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。

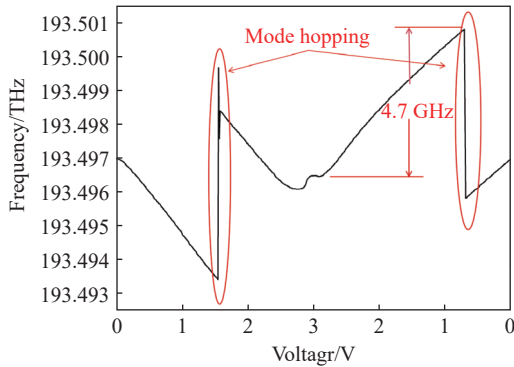


图 7 相位补偿后的频率调谐范围

Fig. 7 Frequency Tuning Range After Phase Compensation

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自动进行补偿。

添加相位补偿的算法后, 利用波长对激光器的频率调谐特性经行多次测试, 结果如图 7 所示, 此台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 4.7GHz, 是未进行相位补偿时的最大频率范围的 1.5 倍以上。由此可见, 采用相位补偿的方法后频率调谐特性有明显改善。

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 7.3mA/V 的系数对电流自动进行补偿, 再加上 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。

加入电流补偿的算法后, 通过波长计测试基于热调谐的可连续调谐的频率范围由图 8 所示。

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*, 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.

由图中可知, 在 0-3 V 范围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。

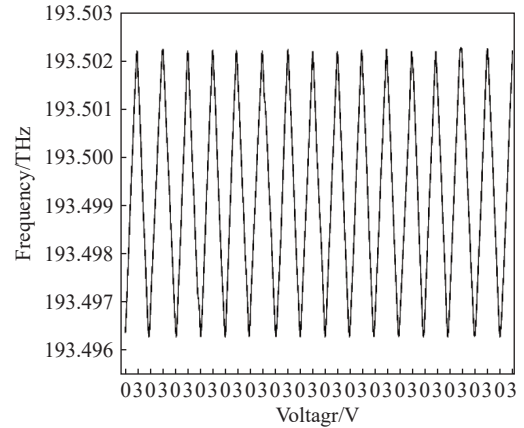


图 8 电流补偿后的频率调谐范围

Fig. 8 Frequency Tuning Range After Current Compensation

4 结 论

本文通过热调谐的方法实现了自注入锁定激光器的频率连续可调, 并且提出了相位补偿和电流补偿的算法进行改进。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。对比算法改进前, 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多次进行连续调谐。根据调谐频率和加热电阻的平方呈现线性关系这一特性, 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。

- [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.

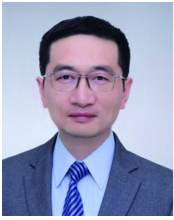
作者简介:



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, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 2005年和2012年均于武汉大学获得学士学位及博士学位, 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,男,博士,研究员,博士生导师,2001年于清华大学获得学士学位,2008年博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,男,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年于中科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