

基于空心光子晶体光纤谐振腔的激光器 频率调谐系数测试

雷明*, 方圆, 于怀勇, 杨恽, 向强, 张丽哲

北京自动化控制设备研究所惯性技术国家重点实验室, 北京 100074

摘要 针对激光器频率调谐系数测试应用的需求, 提出了基于空心光子晶体光纤的激光器频率调谐系数测试装置的方案。首先, 对测试装置的总体方案、光子晶体光纤谐振腔的基本结构进行设计, 重点完成了激光器频率调谐系数测试方法的数值计算和机理分析; 之后, 完成了光子晶体光纤谐振腔的设计和加工, 并搭建了激光器频率调谐系数测试装置; 最后, 对目前常用的窄线宽光纤激光器和半导体激光器进行频率调谐系数测试。光纤激光器的电压-频率调谐系数为 17.6 MHz/V, 与激光器出厂指标基本吻合, 而且光纤激光器的频率调谐系数在调谐范围内具有良好的一致性。半导体激光器在调谐范围内的调谐系数不均匀, 容易受环境的影响, 测得电流-频率调谐系数的平均值为 30.9 MHz/mA。研究结果表明, 测试装置的精度远高于商用波长计, 并且具有良好的长期稳定性, 充分体现了空心光子晶体光纤谐振腔作为频率基准进行频率检测所具有的测频精度高、温度漂移小的技术优势。

关键词 光纤光学; 光纤光学传感器; 空心光子晶体光纤; 频率调谐系数; 光纤激光器; 半导体激光器

中图分类号 TN247; TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0301009

Frequency Tuning Ratio Testing of Lasers Based on Hollow Photonic Crystal Fiber Resonator

Lei Ming*, Fang Yuan, Yu Huaiyong, Yang Yi, Xiang Qiang, Zhang Lizhe

*State Key Laboratory of Inertial Technology, Beijing Institute of Automatic Control Equipment,
Beijing 100074, China*

Abstract In this study, a scheme for measurement equipment based on hollow photonic crystal fiber was proposed to meet the measurement requirement of laser frequency tuning ratio. First, the scheme of the measurement equipment and basic structure of the photonic crystal fiber resonator (PCFR) were designed and the numerical calculation and mechanism analysis of the laser frequency tuning ratio were completed. Second, PCFR was designed and manufactured, and the laser frequency tuning ratio testing setup was constructed. Finally, the frequency tuning ratio of narrow line-width fiber laser and semiconductor laser were tested. The voltage-frequency tuning ratio of the fiber laser is 17.6 MHz/V, which is in accordance with the factory indicators; moreover, the fiber laser's tuning ratio is consistent at the tuning range. The tuning ratio of semiconductor laser in tuning range is non-consistent, which is susceptible to environmental influences. The average current-frequency tuning ratio of the semiconductor laser is 30.9 MHz/mA. This study demonstrates that the accuracy of the proposed testing setup is much higher than that of the commercial wavelength meter, and it also displays good long-term stability. Furthermore, PCFR has technical advantages, such as high frequency measurement accuracy and small temperature drift, as a frequency reference for frequency tuning ratio detection.

Key words fiber optics; fiber optics sensors; hollow photonic crystal fiber; frequency tuning ratio; fiber laser; semiconductor laser

OCIS codes 060.2370; 230.5298; 140.4780; 060.2310

收稿日期: 2019-09-09; 修回日期: 2019-10-02; 录用日期: 2019-11-02

基金项目: “十三五”装备预先研究课题

* E-mail: 15210985670@163.com

1 引言

窄线宽激光器具有超窄线宽和高频率稳定性等突出特点,已被广泛应用于相干光通信、高能粒子加速器、超稳定原子钟等具有重大研究价值和广阔应用前景的领域^[1]。在传感领域,高稳定超窄线宽激光器也被广泛应用,如光纤水听器^[2]、光纤陀螺^[3]、光纤分布式应力监测^[4]等。在窄线宽激光器的研制和应用(如线宽窄带化^[5]、频率跟踪锁模控制^[6]、连续波调频^[7])中,通常需要对激光器的中心频率进行闭环反馈控制,此时除了关注窄线宽激光器中心频率的稳定性以外,还需关注激光器的频率调谐系数,即单位电压或者电流引起的激光器频率变化的大小。频率调谐系数直接决定激光器闭环反馈控制的稳定性,如在基于窄线宽激光器的谐振式光纤陀螺中,频率调谐系数过大将会导致频率跟踪锁模控制振荡甚至失锁^[8],此时需要根据频率调谐系数进行控制参量的修正,以保持陀螺输出的稳定性。综上所述,需要对窄线宽激光器的频率调谐系数进行精确测量,以满足不同领域的应用需求。

传统的频率调谐系数测试装置主要有高分辨波长计、自外差结构型^[9-10]、双激光器拍频型^[11]以及标准具型^[12](如 F-P 腔、光学环形谐振腔)等。目前,商用波长计的中心波长分辨率低至 ± 0.2 pm,对应到频率上远高于目前窄线宽激光器 10 kHz 以下的线宽。基于自外差结构的频率测试系统的时间累积误差大,而且长延迟光纤容易受到环境因素的影响。拍频法需要一台比待测激光器具有更高稳定度的参考激光器,对参考激光器的频率稳定度提出了极高的要求,导致测试系统的成本高、体积大。采用传统保偏光纤(PMF)谐振腔中心频率作为频率基准时,保偏光纤存在温度引起的光纤应力区折射率变化的问题,因此会导致严重的频率漂移,产生测量误差。虽然通过高精度温度控制可以实现高达 0.001 °C 的温度控制,但高精度恒温控制装置的价格不仅昂贵,还增大了系统的复杂程度。

光子晶体光纤(PCF)的概念由 Russel 在 1992 年首次提出。1996 年, Knight 等^[13]成功研制了世界上第一根光子晶体光纤。光子晶体光纤内部由严格排布的空气孔芯和石英构成。光子晶体的带隙效应使得光在带隙限定的准真空区域传输,理论上具有温度漂移小、非线性效应低、高功率传输等突出的技术优势^[14-15]。目前,光子晶体光纤在光电子器件研制、高灵敏度光纤传感以及大容量全光通信等领

域得到了广泛应用^[16]。在基于光纤谐振腔的频率测试装置中,如果采用光子晶体光纤取代传统保偏光纤,就有可能大大降低由温度引入的频率调谐系数测试误差,提高测试精度。

本文提出了采用空心光子晶体光纤搭建光纤谐振腔,并将其作为频率调谐系数测试装置核心敏感部件,然后采用激光器连续线性扫频,并通过信号处理电路进行实时解算处理,实现激光器调谐系数测试装置搭建的方案。本文对测试装置的总体方案、光子晶体光纤谐振腔的基本结构进行设计,完成了激光器频率调谐系数测试方法的数值计算和机理分析、核心敏感部件-光子晶体光纤谐振腔的设计加工,以及激光器频率调谐系数测试装置的搭建,并分别进行了光纤激光器和半导体激光器频率调谐系数的测试。结果表明:装置的测试精度远高于商用波长计,而且具有良好的长期稳定性。这说明采用空心光子晶体光纤谐振腔作为频率基准进行频率调谐系数检测具有测频精度高、温度漂移小的技术优势。

2 理论仿真与系统设计

空心光子晶体光纤谐振腔作为激光器频率调谐系数测试装置的核心敏感部件,其结构直接决定了测试精度。对于采用传统方法熔接的光子晶体光纤,空气孔芯容易塌陷,导致光子晶体光纤与保偏光纤熔接时会产生极大的熔接损耗,单点熔接损耗高达 2.7 dB^[17],因此需要采用特殊的加工工艺实现光子晶体光纤谐振腔的制备。由于透射式谐振腔方案具有较高的信噪比,因此本文采用透射式光子晶体光纤谐振腔结构。

测试装置的总体结构如图 1 所示,待测激光器通过法兰头连接进入光路,采用光纤隔离器进行散射光隔离,以确保散射光不会对激光器产生影响;随后通过可调光衰减器(VOA)对光强进行调节,以匹配经谐振腔传输后的探测信号的强度;随后光波经由光纤准直器(FC1)进入空心光子晶体光纤谐振腔(PCFR)内,经微光学分光镜(SBS1)反射后,通过光纤准直器(FC2)耦合进入空心光子晶体光纤谐振腔,并沿逆时针光路进行传输。光波经光纤准直器(FC3)准直后,一部分光在微光学分光镜(SBS2)处直通而过,继续在谐振腔内部传输,传输过程中通过偏振分光棱镜(PBS)进行光学起偏,以消除次偏振态对主偏振态的影响;到达 SBS2 处的另外一部分光反射进入光纤准直器(FC4),在 FC4 的出射端发生多光束干涉,形成暗背景下的亮条纹,即透射式谐

振信号输出,然后再经光电探测器(PD)进行光电转换后进入数字信号处理及控制模块(DSPC),在此进

行激光器频率调谐系数的解算,并通过通信端口将测得的频率调谐系数输出显示。

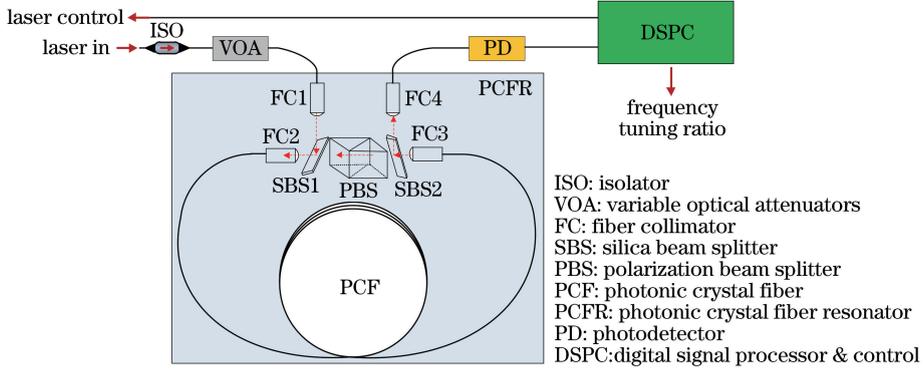


图 1 基于空心光子晶体光纤谐振腔的频率调谐系数测试装置

Fig. 1 System structure diagram of laser frequency tuning ratio testing equipment based on PCFR

根据多光束干涉原理,建立空心光子晶体光纤谐振腔的传递函数^[18],即

$$E_{out} = \frac{r\alpha_c \sqrt{\alpha_1} \exp(i\omega_0 \tau)}{1 - (1-r) \sqrt{\alpha_c} \sqrt{\alpha_1} \exp(i\omega_0 \tau)} \cdot E_0, \quad (1)$$

式中: E_{out} 为空心光子晶体光纤谐振腔输出光的电场强度; E_0 为入射光的电场强度; r 为分光棱镜的反射率; α_c 为谐振腔耦合损耗; α_1 为空心光子晶体光纤的传输损耗; ω_0 为入射光的角频率; τ 为空心光子晶体光纤谐振腔的渡越时间。得到谐振腔输出光强 I 为

$$I = E_{out} \cdot E_{out}^* = \frac{r^2 \alpha_c^2 \alpha_1}{1 - 2(1-r) \sqrt{\alpha_c} \sqrt{\alpha_1} \cos(\omega_0 \tau) + (1-r)^2 \alpha_1 \alpha_c} \cdot |E_0|^2, \quad (2)$$

式中 * 表示共轭。

根据(2)式对空心光子晶体光纤谐振腔在不同输出光频率下的谐振输出光强进行仿真,仿真结果如图 2 所示,其中 d_{FSR} 为谐振腔的自由谱线宽度。由图 2 可见:随着激光器输出光频率的变化,探测器端显示为不同的光强输出,总体表现为暗背景下的亮条纹;当激光器中心频率等于谐振腔的谐振频率时,谐振腔的输出具有最大的光强,表现为典型的透射式谐振曲线。进一步分析可以发现谐振曲线的信噪比随着谐振腔耦合损耗的增大而逐渐劣化,因此,需要对空心光子晶体光纤谐振腔的输入输出耦合损耗进行精密控制。

自由谱线宽度定义为两个相邻谐振信号的频差,即

$$d_{FSR} = c/(nL), \quad (3)$$

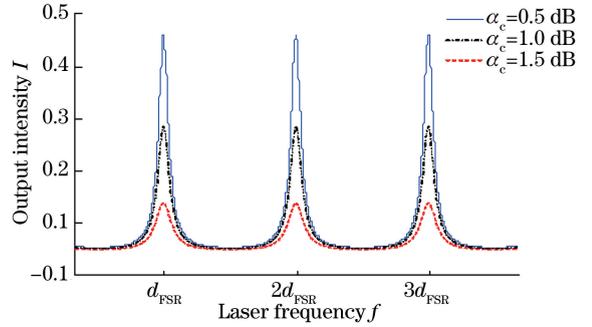


图 2 空心光子晶体光纤谐振腔谐振峰信号的仿真结果

Fig. 2 Simulated resonance signal of PCFR

式中: c 为真空中的光速; L 为空心光子晶体光纤谐振腔的长度; n 为光纤的折射率。在光子晶体光纤中,光在光子带隙所限定的准真空区域传输,故折射率视为 1。谐振曲线的信噪比由谐振腔清晰度 F 来描述,即

$$F = \frac{d_{FSR}}{\delta_f}, \quad (4)$$

式中: δ_f 为窄线宽光纤激光器的线宽,线宽越窄,谐振腔的实测谐振曲线就越接近于理论值。

首先以窄线宽光纤激光器为例进行频率调谐系数的求解,通过改变窄线宽光纤激光器压电陶瓷两端的电压实现输出光频率的调谐。设定激光器的电压-频率调谐系数为 k ,线性扫频时两个相邻谐振峰信号对应的激光器调谐电压分别为 V_1 和 V_2 ,则自由谱线宽度可表示为

$$d_{FSR} = k(V_1 - V_2) = k\Delta V. \quad (5)$$

将(5)式代入(3)式可得激光器频率调谐系数 k 为

$$k = \frac{c}{nL\Delta V}. \quad (6)$$

由于 c 、 n 、 L 均为已知参数,因此只需要根据实际谐振曲线的扫频结果,就可以确定相邻谐振峰信号对应的两个驱动电流值,即可求得激光器的频率调谐系数。

作为窄线宽激光器另一个重要分支的半导体激光器,因具有小体积、低成本等优势而在光纤传感、激光测距测速等领域得到了广泛应用。半导体激光器的频率调谐方式包括驱动电流和管芯温度调谐。管芯温度的调谐系数高达 $12 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,且响应慢^[19]。与之不同,驱动电流具有调谐线性度好、响应快的技

术优势,因此在激光器频率控制上通常采用驱动电流调谐方案。设线性扫频时两个相邻谐振峰信号对应的驱动电流的变化为 Δi ,则可以得到半导体激光器的电流-频率调谐系数为

$$k = \frac{c}{nL\Delta i} \quad (7)$$

在数字信号处理及控制模块中,分别根据(6)式和(7)式进行光纤激光器和半导体激光器频率调谐系数的解算处理。具体的信号处理流程如图 3 所示。

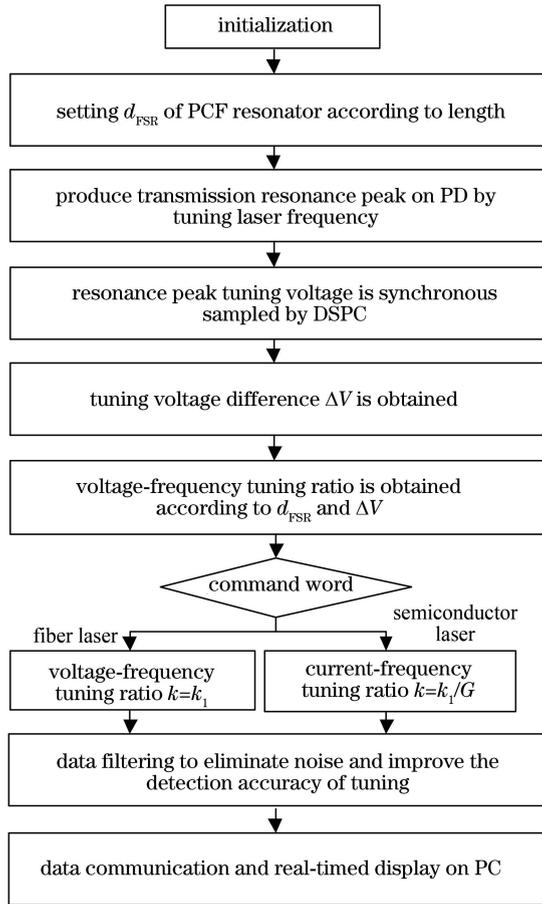


图 3 频率调谐系数测试信号处理流程

Fig. 3 Processing flow of laser frequency tuning ratio testing signal

首先给检测电路通电,初始化程序。然后从控制器内部读取根据(3)式求得的 d_{FSR} 参数,随后程序产生低频线性锯齿波信号,该信号经信号处理电路放大后施加于激光器的频率控制端,此时由于谐振腔的谐振效应,在探测器端会观察到明显的透射式谐振峰信号,控制器控制 AD 转换器进行谐振信号和扫频锯齿波信号的同步采样,并对相邻谐振峰极点所对应的锯齿波电压进行记录,然后通过减法器相减,求得单个 d_{FSR} 所对应的电压变化 ΔV 。随后在现场可编程逻辑门阵列

(FPGA) 内部按照(6)式进行电压-频率调谐系数的解算,随后根据控制命令字进行激光器类型的判定:若为光纤激光器,则直接将解算得到的电压-频率调谐系数作为光纤激光器的电压-频率调谐系数,并输出;若为半导体激光器,则将电压调谐系数除以数字信号处理及控制模块中驱动控制部分的电压-电流增益 G ,得到半导体激光器的电流-频率调谐系数。接着根据单次测频速率以及上位机串口传输速率进行多点采样,并进行滤波处理,以提升频率调谐系数的测试精度;最终通过数字通

信接口将测得的频率调谐系数上传给上位机,并通过显示器实时显示。

3 系统搭建及测试

搭建了激光器频率调谐系数测试装置,实物如图4(a)所示。该装置的敏感核心为空心光子晶体光纤谐振腔,谐振腔样品如图4(b)所示,设计 SBS1 和 SBS2 的耦合分光比为 95:5, PBS 的偏振消光比为 30 dB,光纤准直器与 SBS1、SBS2 之间采用空间对耦方式进行光信号的连接,具体的对轴位置和角度采用五维调节架进行精密调节。在此过程中,根据探测器

PD 探测光强的大小,以实现最佳的光信噪比,最终通过紫外胶实现结构的固化,以确保其性能稳定可靠。谐振腔采用长度为 20 m 的空心光子晶体光纤,其传输损耗为 15.4 dB/km,虽然远高于传统保偏光纤 0.4 dB/km 的传输损耗,但由于其光纤长度短,故而对谐振腔性能的影响较小。根据(3)式计算可得到谐振腔的自由谱线宽度 d_{FSR} 为 15 MHz,即两个相邻谐振峰之间的频率间距为 15 MHz。数字信号处理及控制电路以 Altera 公司 FPGA 作为控制核心,主要用于完成激光器的线性扫频以及激光器频率调谐系数的解调、处理和输出等功能。

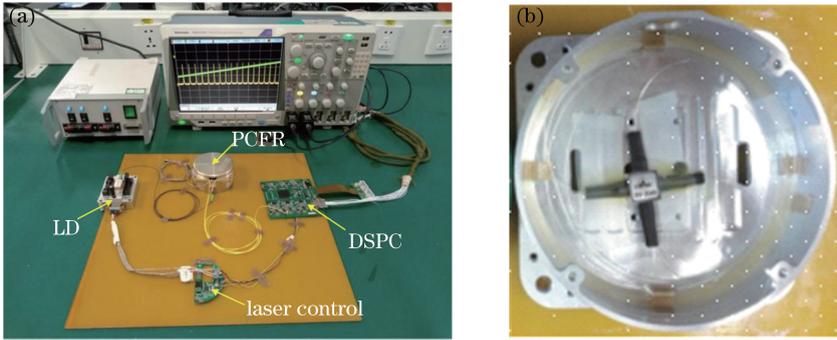


图 4 激光器频率调谐系数的测试装置以及谐振腔实物图。(a)测试装置;(b)谐振腔实物图

Fig. 4 Prototype of laser frequency tuning ratio testing equipment and photo of PCFR.

(a) Testing equipment; (b) photo of PCFR

首先采用某型窄线宽光纤激光器进行谐振曲线的测试,激光器的中心波长为 1550.12 nm,标称线宽为 100 Hz,技术手册给出的电压-频率调谐系数为 -0.13 pm/V ,即 16.25 MHz/V 。首先,检测电路产生低频锯齿波(锯齿波频率 $f_{\text{saw}} = 1 \text{ Hz}$,峰峰值 $V_{\text{PP_saw}} = 5 \text{ V}$),并施加在压电陶瓷电压调谐端,以实现激光器的线性调频,此时从探测器端可以观察到明显的透射式谐振峰信号。一次扫频周期内测得的谐振峰信号与扫频电压如图 5 所示,可见:随着扫频电压线性变化,谐振信号输出为暗背景下的亮条纹,

与图 2 中的仿真分析结果相吻合。进一步分析可以发现,在整个扫频过程中测得的谐振峰间距均匀不变,这表明采用的光纤激光器频率调谐系数在 $0 \sim 5 \text{ V}$ 范围内具有较好的一致性,而且光子晶体光纤谐振腔温度漂移系数小的技术优势得以充分发挥。

基于频率调谐系数测试装置进行 30 min 的频率调谐系数测试。由于单次完整的扫频周期为 1 s,故对 1 s 内得到的多次电压调谐系数进行平均就可以消除测量误差的影响。数据输出速率为 1 data/s,测试结果如图 6 所示,可见:光纤激光器的电压-频率调谐系数为 17.6 MHz/V ,与出厂指标的吻合度较高。在进行测试的 30 min 内,室内温度传感器检测到谐振腔的温度变化了 $0.34 \text{ }^\circ\text{C}$,而装置测得的频率调谐系数并未发生明显漂移,这进一步验证了采用光子晶体光纤谐振腔作为频率基准具有良好的环境适应性。

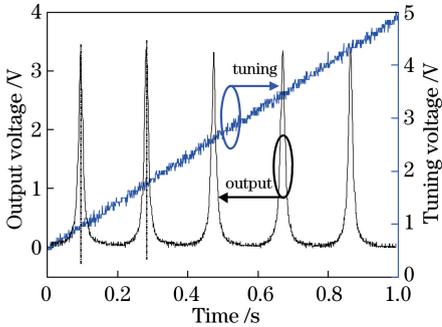


图 5 采用窄线宽光纤激光器进行线性扫频实测的谐振曲线

Fig. 5 Measured resonance curves by frequency sweep of narrow line-width fiber laser

下面对某型半导体激光器进行电流-频率调谐系数测试,激光器的中心波长为 1550.16 nm,线宽为 2 kHz,出厂手册中并未给出其电流-频率调谐系数,因此首先采用波长计进行不同驱动电流下的波长测试。受限于波长计分辨率的制约,测得的半导

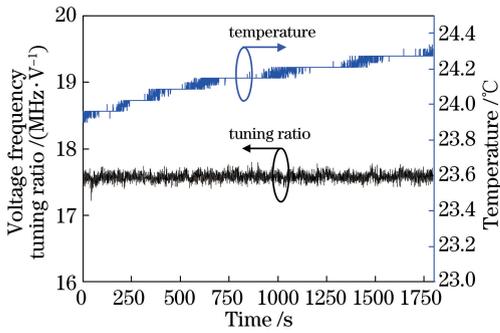


图 6 窄线宽光纤激光器频率调谐系数的测试结果
Fig. 6 Measured frequency tuning ratio of narrow line-width fiber laser

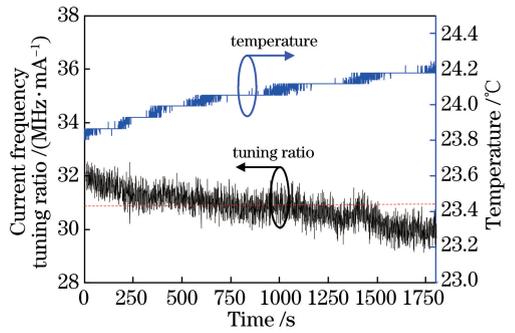


图 8 窄线宽半导体激光器频率调谐系数的测试结果
Fig. 8 Measured frequency tuning ratio of narrow line-width semiconductor laser

体激光器电流-波长调谐系数在 $0.1 \sim 0.3 \text{ pm}/\text{mA}$ 之间^[20], 对应的电流-频率调谐系数为 $12.5 \sim 37.5 \text{ MHz}/\text{mA}$ 。为了消除半导体激光器自身温度变化对测试精度的影响, 将半导体激光器的管芯温度设定为恒温 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。通过驱动电流线性扫频测得的谐振峰信号如图 7 所示。可见, 在扫频过程中, 观察到的谐振峰信号的噪声水平明显大于采用光纤激光器扫频时谐振峰信号的噪声水平, 这主要是因为半导体激光器的频率噪声比光纤激光器大(噪声测试仪测试结果表明该型光纤激光器的频率噪声 $< 20 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ @ 1kHz , 半导体激光器的频率噪声为 $< 3 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ @ 1MHz)。进一步分析图 7 可以发现, 在激光器线性扫频过程中, 从探测器上检测到的谐振曲线间距发生了明显的偏移, 测试得到 d_{FSR} 对应的电压变化高达 11.2% 。由于光子晶体光纤谐振腔高的温度稳定特性可知, 在 $0 \sim 5 \text{ V}$ 电压线性扫频时, 应该是半导体激光器的频率调谐系数在不同的驱动电流段发生了改变, 在此范围内半导体激光器电流调谐系数的最大变化为 11.2% 。

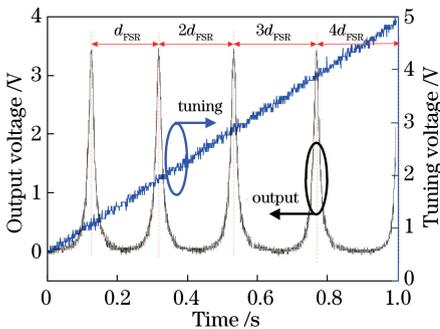


图 7 采用窄线宽半导体激光器线性扫频测得的谐振曲线
Fig. 7 Measured resonance curves using frequency sweep of narrow line-width semiconductor laser

采用频率调谐系数测试装置进行 30 min 的频率调谐系数测试, 测试结果如图 8 所示。

从图 8 中可以看出, 半导体激光器电流-频率调谐系数的平均值为 $30.9 \text{ MHz}/\text{mA}$, 其在测试数据的稳定性上明显劣于光纤激光器测得的电压-频率调谐系数, 频率调谐系数随着温度变化发生了明显的漂移。这主要是由半导体激光器大的频率噪声和频率漂移、非均匀的频率调谐系数及环境因素导致的。

为了验证光子晶体光纤谐振腔在温度变化条件下进行调谐系数测量的技术优势, 采用 20 m 保偏光纤配合两个 $95:5$ 光耦合器, 完成了保偏光纤谐振腔的研制, 并进行了系统搭建。该系统采用光纤激光器作为光源。在恒温箱中对比保偏光纤谐振腔和光子晶体光纤谐振腔变温条件下测得的频率调谐系数, 设定温度变化范围为 $-20 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$, 测得频率调谐系数的实验数据如图 9 所示。可见, 在相同的温度变化下, 基于光子晶体光纤谐振腔的频率调谐系数测试装置的稳定性明显高于基于保偏光纤谐振腔频率调谐系数测试装置的稳定性。

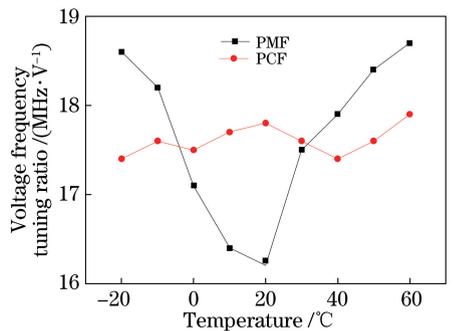


图 9 变温条件下保偏光纤谐振腔和光子晶体光纤谐振腔频率调谐系数的测试结果

Fig. 9 Measured frequency tuning ratio of PMF and PCF resonator at variable temperatures

4 结 论

本文针对窄线宽激光器频率调谐系数测试的需

求,提出了基于空心光子晶体光纤谐振腔的激光器频率调谐系数测试装置方案。对测试装置的总体方案、光子晶体光纤谐振腔的基本结构进行了设计,重点开展了激光器频率调谐系数测试方法的数值计算和机理分析;完成了光子晶体光纤谐振腔的设计和加工,搭建了激光器频率调谐测试装置,并对窄线宽光纤激光器和半导体激光器进行了室温条件下和变温条件下频率调谐系数的测试。测试结果表明:半导体激光器的频率噪声明显大于光纤激光器,光纤激光器的电压-频率调谐系数为 17.6 MHz/V,与激光器出厂指标吻合;半导体激光器的调谐系数不均匀,而且容易受环境因素的影响,电流-频率调谐系数的平均值为 30.9 MHz/mA。采用光子晶体光纤谐振腔相较于保偏光纤谐振腔具有温度稳定性更高的技术优势。

参 考 文 献

- [1] Lei X, Hu Q, Li J, et al. Suppression of Kerr-effect-induced bias for resonator fiber optic gyroscope[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 100606.
雷兴, 胡强, 李俊, 等. 谐振式光纤陀螺克尔效应误差的抑制[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 100606.
- [2] Wang Z H, Zhang H, Wang W, et al. Noise optimization of repeaterless remote demodulation systems of fiber-optic hydrophone [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(11): 1106006.
汪樟海, 张红, 王巍, 等. 光纤水听器无电中继远程解调系统噪声优化[J]. *中国激光*, 2017, 44(11): 1106006.
- [3] Jiang Z G, Hu Z F. Analysis on sensitivity of resonant fiber optic gyro [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0706001.
蒋治国, 胡宗福. 谐振型光纤陀螺的灵敏度分析[J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0706001.
- [4] Pan L, Liu K, Jiang J F, et al. Distributed fiber-optic vibration and temperature sensing system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0110002.
潘亮, 刘琨, 江俊峰, 等. 分布式光纤振动和温度双物理量传感系统[J]. *中国激光*, 2018, 45(1): 0110002.
- [5] Wang J, Chen D J, Cai H W, et al. Optical phase-locked loop of single section distributed feedback semiconductor laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(4): 0401001.
王建, 陈迪俊, 蔡海文, 等. 单段式分布式反馈半导体激光器光学锁相环研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(4): 0401001.
- [6] Li Y Y, Zhang H Y, Wang T F, et al. Range-Doppler imaging recognition simulation of the mode-locked coherent lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(8): 0830004.
李远洋, 张合勇, 王挺峰, 等. 锁模相干激光雷达距离-多普勒成像识别仿真[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(8): 0830004.
- [7] Guo L, Xing M D, Liang Y, et al. Synthetic aperture imaging lidar imaging algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(2): 448-452.
郭亮, 邢孟道, 梁毅, 等. 合成孔径成像激光雷达成像算法研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(2): 448-452.
- [8] Zhi Y, Feng L, Lei M, et al. Low-delay, high-bandwidth frequency-locking loop of resonator integrated optic gyro with triangular phase modulation [J]. *Applied optics*, 2013, 52(33): 8024-8031.
- [9] Zhi Y, Feng L, Lei M. Delay self-heterodyne measurement of narrow linewidth laser frequency drift characteristic [J]. *Optik*, 2014, 125(13): 3124-3126.
- [10] Tsuchida H. Laser frequency modulation noise measurement by recirculating delayed self-heterodyne method [J]. *Optics letters*, 2011, 36(5): 681-683.
- [11] Zhu N H. *Microwave design and characterization of optoelectronics devices and packaging* [M]. Beijing: Science Press, 2007
祝宁华. *光电子器件微波封装和测试* [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [12] Xu P, Hu Z, Ma M, et al. Mapping the optical frequency stability of the single-longitudinal-mode erbium-doped fiber ring lasers with saturable absorber [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 49: 337-342.
- [13] Knight J C, Birks T A, Russell P S J, et al. All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding [J]. *Optics letters*, 1996, 21(19): 1547-1549.
- [14] Zhang Y N. Design and optimization of low-loss low-nonlinear high negative-dispersion photonic crystal fiber [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(8): 084213.
张亚妮. 低损耗低非线性高负色散光子晶体光纤的优化设计[J]. *物理学报*, 2012, 61(8): 084213.
- [15] Dai J. *Researches on the photonic-bandgap fibers and the application of photonic-bandgap fibers* [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009: 3-4. .
戴娟. *光子带隙型光子晶体光纤及其应用的研究* [D]. 北京: 北京邮电大学, 2009: 3-4.
- [16] Chen W. *Characteristic and application trend of*

- photonic crystal fiber [J]. Communications World, 2017(17): 47-49.
- 陈伟. 光子晶体光纤的特性及应用发展趋势 [J]. 通信世界, 2017(17): 47-49.
- [17] Blin S, Kim H K, Digonnet M J F, et al. Reduced thermal sensitivity of a fiber-optic gyroscope using an air-core photonic-bandgap fiber [J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(3): 861-865.
- [18] Jiao H, Feng L, Wang K, et al. Analysis of polarization noise in transmissive single-beam-splitter resonator optic gyro based on hollow-core photonic-crystal fiber [J]. Optics Express, 2017, 25(22): 27806-27817.
- [19] Lew Stolpner. RIO PLANEX external cavity laser datasheet [EB/OL]. RIO corporation: Santa Clara, CA. [2019-09-09]. <http://www.rio-lasers.com>.
- [20] Li J H, Yu H Y, Lei M, et al. Experimental research on multi-light source module of R-FOG [J]. Navigation Positioning and Timing, 2019, 6(3): 119-124.
- 李建华, 于怀勇, 雷明, 等. 谐振式光纤陀螺用光源模块实验研究 [J]. 导航定位与授时, 2019, 6(3): 119-124.