

调制光栅 Y 分支可调谐激光器高精度波长调谐特性

郑胜亨, 杨远洪*

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

摘要 搭建了调制光栅 Y 分支(MGY)可调谐激光器高精度波长调谐系统,实现了粗扫描结合细扫描的高精度波长扫描标定。在此基础上,对 MGY 激光器输出波长以及内置法布里-珀罗(F-P)标准具的温度漂移特性进行分析,发现 MGY 激光器输出波长与温度具有良好的线性关系,且其输出波长曲线的斜率不变,截距随温度线性变化。研究了基于外部气体吸收基准的高精度波长校准方法,并进行实验测试。研究结果表明,在 $-25\sim+75\text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内,波长扫描范围为 40 nm 时,所搭建系统的调谐线性度优于 0.9999,调谐波长精度优于 0.18 pm,准确度优于 0.12 pm。

关键词 激光器; 半导体激光器; 光谱分析; 光纤光栅解调; 波长调谐

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0201001

High Precision and Accuracy Wavelength Tuning Characteristics of Modulated Grating Y-Branch Tunable Lasers

Zheng Shengheng, Yang Yuanhong*

School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract A high precision and accuracy wavelength tunable system for a modulated grating Y-branch (MGY) tunable laser is built. The high-precision wavelength scanning and calibration are realized by coarse scanning and fine scanning. Based on this, the temperature drift characteristics of the output wavelength and the internal Fabry-Perot (F-P) etalon are tested. It is found that there exists a good linear relationship between the output wavelength of this MGY laser and temperature, whose slope is constant. The intercept varies linearly with temperature. A high precision and accuracy wavelength calibration method based on external gas absorption reference is researched and its experimental test is conducted. The research results show that within the temperature range of $-25\sim+75\text{ }^\circ\text{C}$ and the wavelength scanning range of 40 nm, the established system possesses a tuning curve linearity better than 0.9999, a tuning wavelength precision better than 0.18 pm, and an accuracy better than 0.12 pm.

Key words lasers; semiconductor lasers; spectral analysis; fiber grating demodulation; wavelength tuning

OCIS codes 250.5960; 070.4790; 060.3735; 060.4510

1 引言

可调谐激光器是光谱分析和光纤光栅解调系统中的核心器件,具有较好的应用前景^[1-5]。半导体可调谐激光器主要有分布式反馈(DFB)激光器^[6-7]、取样光栅分布式布拉格反射(SG-DBR)激光器^[8]以及调制光栅 Y 分支(MGY)激光器^[9]。MGY 激光器利用 Y 状双光栅的游标效应对输出波长进行调谐^[10],调谐时光功率稳定,输出功率可超过

10 dBm,边模抑制比 R_{SMSR} 大于 30 dB,调谐范围大于 40 nm,调谐时间达到纳秒量级^[11-12],广泛应用于光通信、光谱分析和光纤光栅解调等领域。目前,国内外研究者针对 MGY 调谐技术进行大量研究。Müller 等^[13]采用等间距电流扫描的调谐方式对 MGY 激光器进行调谐,其调谐范围为 40 nm,调谐步长为 5~10 pm。杜泽翰等^[14]采用调谐区电流扫描标定的方法对 SG-DBR 激光器进行调谐,其调谐范围为 40 nm,调谐步长为 8 pm。崔巍等^[4]采用电

收稿日期: 2018-08-20; 修回日期: 2018-09-25; 录用日期: 2018-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(U1637106,61227902)、创新团队发展计划(IRT1203)

* E-mail: yhyang@buaa.edu.cn

流和温度共同调谐的方法对 V 型腔激光器进行调谐,其调谐步长达到 1 pm,但是调谐范围仅为 12 nm。目前,相关的研究主要集中在调谐范围和步长两个参数上,鲜有对于在大范围温度变化条件下如何保证调谐波长准确性的研究。光谱在线分析和光纤传感器的广泛应用,对扫描激光器在现场工作条件下调谐波长的精度和准确度提出了更高的要求。

为满足不同环境现场应用对高精(精密)准(准确)扫描激光器的要求,本文以 MGY 可调谐激光器为对象,构建了可调谐激光器高精度扫描、标定系统,对 MGY 激光器输出特性和温度稳定性进行系统的实验研究和分析,在此基础上,研究了基于乙炔气体吸收基准的高精密度、高准确度波长扫描和校准技术,并进行了宽温范围实验测试,实现了高精准波长调谐。

2 MGY 激光器调谐原理及温度稳定性

2.1 MGY 激光器调谐原理

MGY 激光器是一种新型的半导体可调谐激光器,管芯结构如图 1 所示,由光栅反射区、多模干涉耦合器(MMI)、相位区、增益区、集成前向反射器、半导体光放大器(SOA)组成。激光器的输出波长由左、右光栅反射区和相位区进行联合控制,两个光栅反射区产生间距不等的梳状反射谱,通过调节反射区参数控制重合峰的位置,保证某一时刻的反射

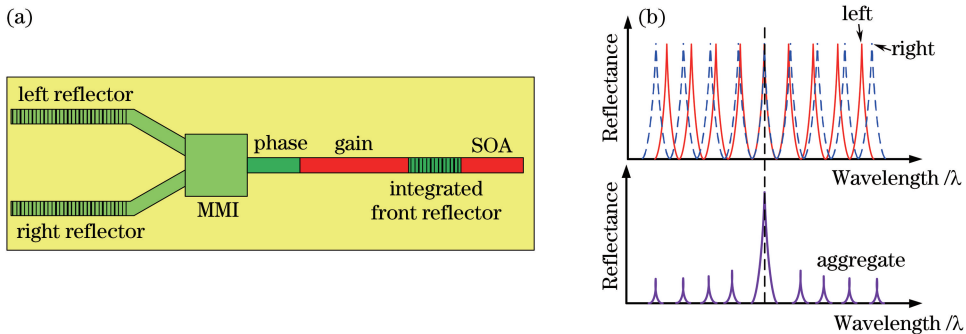


图 1 MGY 激光器。(a)管芯结构示意图;(b)调谐原理

Fig. 1 MGY laser. (a) Structural diagram of laser diode; (b) tuning principle

2.3 MGY 激光器调谐特性测试

利用上述波长扫描标定系统对 MGY 激光器(ATSL7503,奥新科技,中国)进行调谐特性测试。首先对激光器左、右反射区的调谐特性进行研究,室温条件下,通过激光器控制仪提供的 I_{TEC} 将激光器的工作温度控制在 25 °C。由于所用波长计的最大输入功率为 10 mW,因此将 MGY 激光器的 I_G 设置

光波长为一对重合峰的反射波长,再由相位区控制输出光的相位谐振条件,实现波长的细调,得到不同波长的输出光。改变激光器的光栅反射区和相位区的注入电流会引起该区半导体材料的自由载流子浓度发生变化,从而改变材料的有效折射率,实现对激光器输出波长的调谐和控制。通过大量的测试、标定和数据处理获取电流-波长查找表,以实现波长的精确调谐和控制。

2.2 MGY 激光器高精度扫描标定系统

利用 LabVIEW 虚拟仪器平台、可调谐精密电流源、波长计、数字万用表等设备搭建了一套可调谐激光器高精度扫描标定系统,如图 2 所示。扫描标定系统主要由计算机(PC)主控、激光器驱动、信息采集三部分组成。计算机作为整个系统的主控设备,向各个驱动器发出控制命令并收集信息采集部分的测量信息,基于 LabVIEW 平台,编写了自动测试程序,实现自动标定测试。电流驱动采用精密电流源(6211,Keithley,美国)提供增益区电流 I_G 、左反射区电流 I_L 、右反射区电流 I_R 和相位区电流 I_P ,电流驱动精度为 1 μ A;激光器驱动器(LPA9082,ILX Lightwave,美国)提供 SOA 电流 I_{SOA} 以及半导体制冷器电流 I_{TEC} 。利用波长计(86122A,Keysight,美国)测量输出激光的波长 λ ,精度为 0.3 pm;使用数字万用表(34970A,Agilent,美国)测量激光器光电探测器(PD)管脚电流 I_{PD} 和法布里-珀罗(F-P)标准具管脚电流 I_{Ref} ,电流测量精度为 1 μ A。

为 98 mA, I_{SOA} 设置为 30 mA,此时激光器的输出功率约为 9 mW,且由图 1(a)可知,调谐特性由反射区和相位区决定,增益区和 SOA 区只影响输出功率。将相位区电流设置为 0,左、右反射区的电流扫描范围均为 33 mA,扫描步长设为 0.2 mA。图 3(a)和图 3(b)分别为 MGY 激光器输出光的波长和 R_{SMSR} 随左、右反射区电流变化的热图。可以看到,激光器

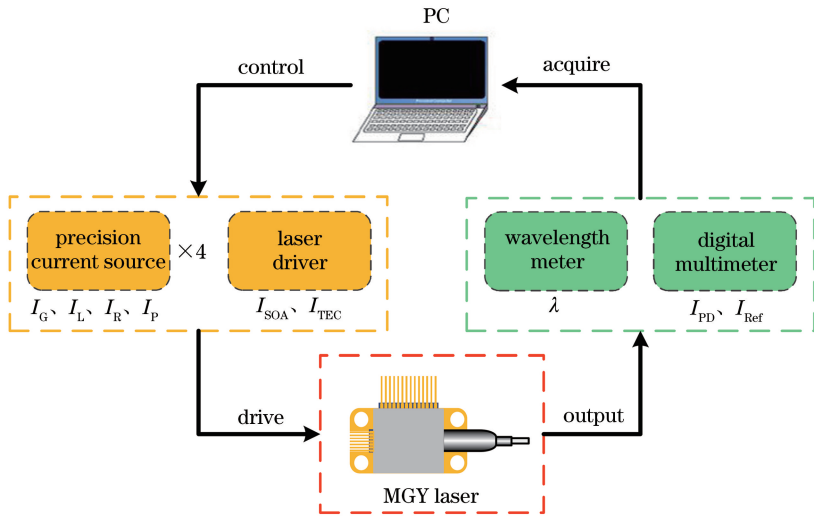


图 2 波长扫描标定系统结构图

Fig. 2 Structural diagram of wavelength scanning and calibration system

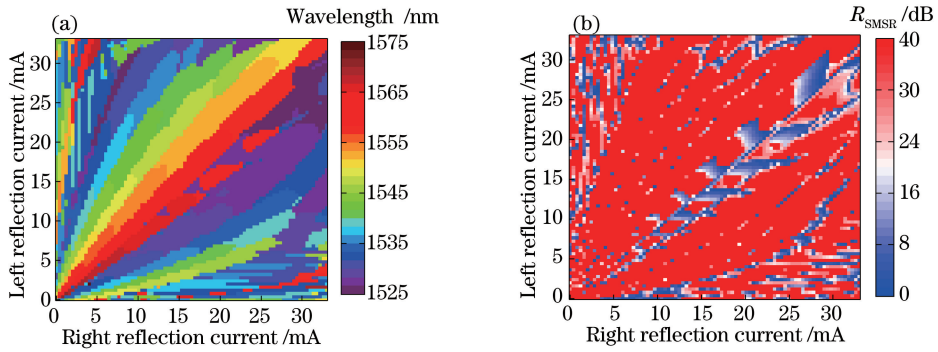


图 3 左、右反射区的调谐特性。(a)电流-波长热图;(b)电流- R_{SMSR} 热图

Fig. 3 Tuning characteristics at left and right reflection regions. (a) Heat map of current-wavelength;

(b) heat map of current- R_{SMSR}

输出波长覆盖范围为 1525~1575 nm, 波长总跨度达 50 nm, 并且 R_{SMSR} 大于 30 dB 的区域主要集中在 1528~1568 nm 范围。

对激光器相位区的调谐特性进行研究, 相同条件下, 固定左、右反射区电流, 改变相位区电流进行波长扫描, 可实现兴趣点附近波长细扫描。图 4(a)

和图 4(b)所示分别为 1540 nm 和 1560 nm 处相位区的典型扫描结果, 扫描电流为 7.5 mA, 扫描步长为 0.01 mA。可以看到, 相位区电流扫描可以实现约 0.3 nm 的波长周期性变化, 且在图 4 所示的红色方框范围具有很好的线性度, 利用这一小段线性区域可以对输出波长进行亚皮米步长的精确线性

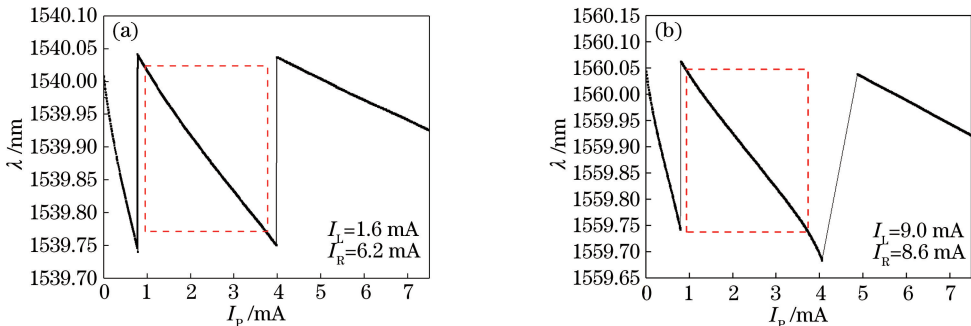


图 4 不同波长处相位区的扫描结果。(a) 1540 nm;(b) 1560 nm

Fig. 4 Scanning results at phase region under different wavelengths. (a) 1540 nm; (b) 1560 nm

调谐。

为保证激光波长的大范围、精密调谐,利用 MGY 激光器相位区电流与输出波长分段的线性特性,提出一种反射区粗扫描结合相位区细扫描的高精度波长扫描标定方法。标定的流程如图 5 所示。首先,以 0.2 mA 的电流间隔分别对左反射区和右反射区进行扫描,并自动采集激光器的输出波长以及探测器和 F-P 标准具的电流。接着利用软件自动对得到的初始数据按照波长进行升序排列,并且以 R_{SMSR} 大于 30 dB 以及附近各无模式跳变点为依据进行波长点筛选,制作较大波长间距的初始查找

表。然后,在初始查找表中各个波长点处对相位区以 0.01 mA 的电流间隔进行精细扫描,得到精细查找表,并利用相位区电流与输出波长具有分段线性相关的特点,在每个波长点的相位扫描区域内选择一段大范围高线性度区间以 1 pm 波长间隔进行线性插值,之后将不同区间进行首尾相连,并在重复波长区域中选取平均 R_{SMSR} 较大的区域,得到最终的电流-波长查找表(波长范围为 1527.9~1568.1 nm,数据点数为 40201 个)。通过调用该查找表就可以实现对激光器输出波长的精确扫描和控制,采用该技术,实现了皮米级的波长扫描。

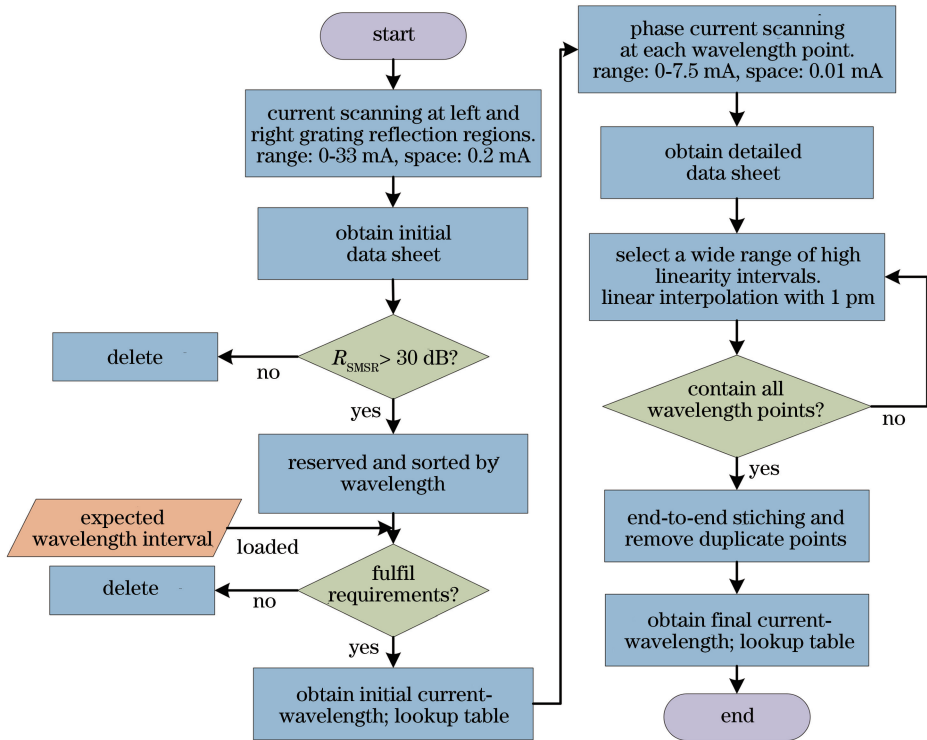


图 5 波长标定流程

Fig. 5 Flow of wavelength calibration

精密度和准确度是表征测量结果的两个重要指标。为了得到系统的精密度和准确度,在常温下,根据上述电流-波长查找表控制 MGY 激光器波长扫描的参数,总共进行 5 次扫描测试,得到全范围扫描曲线如图 6(a)所示,其横坐标为基于查找表的设定波长,纵坐标为波长计测得的输出波长,系统和被测激光器稳定性和重复性非常好[图 6(b)],5 次测量结果几乎完全重合。由于电流-波长查找表通过多次标定后获得波长值,在此将设定波长视作波长真实值,各次扫描结果为实测值。计算得到系统在常温下的调谐精密度(误差曲线峰峰值)为 0.20 pm,调谐准确度具透射光谱作为参考曲线,可以判定激光器输出波

(平均测试值与真实值之差)为 0.14 pm。

2.4 MGY 激光器温度特性测试

MGY 激光器最初的设计目的是作为波分复用通信系统的光源,负责提供动态波长分配和波长路由^[11-12]。图 7 所示为 MGY 激光器封装后的内部结构^[15]。激光器芯片与热敏电阻集成在第一块载体上,第一块载体与内部光学组件集成在第二块载体上,并通过集成在器件内部的半导体制冷器对整个器件进行一体化温度控制。器件中,F-P 标准具的频率间隔设置为 50 GHz,并且透射峰峰值波长与国际电信联盟(ITU)标准波长相对应。将 F-P 标准具是否偏离 ITU 标准波长并进行校准,其温度稳定

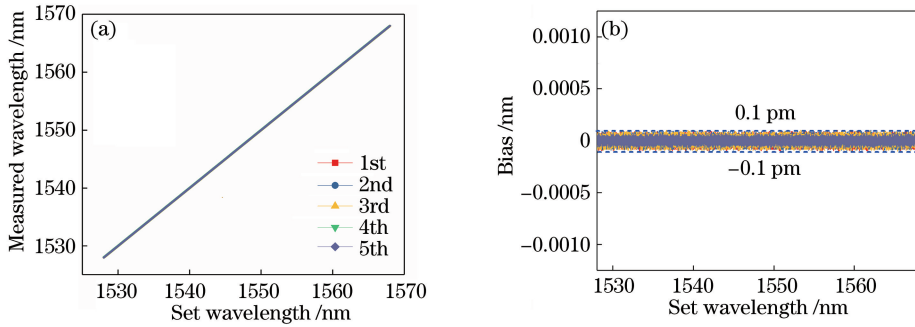


图 6 常温下波长调谐性能。(a)扫描曲线;(b)误差曲线

Fig. 6 Wavelength tuning performance at normal temperature. (a) Scanning curves; (b) bias curve

性可反映对应输出波长的稳定性。为确定 MGY 激光器的温度特性,对 MGY 激光器的输出波长和 F-P 标准具的温度特性进行测试。实验时,将 MGY 激光器置于恒温箱中,此时激光器的热电制冷模块正常工作,恒温箱温度从 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $+75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (温度范围根据 MGY 激光器的标称工作温度 $-5\sim +75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 进行扩展得到),温度步进为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,在每个温度点保温 2 h 后进行测试。根据 2.3 节测试获得的波长-电流数据表进行全程扫描,得到 F-P 标准具归一化透射谱(图 8)和 MGY 激光器设定波长-输出波长曲线(图 9)。可以看到,随着温度的变化,F-P 标准具的透射光谱波长和激光器管芯的输出波长都发生了漂移。从图 8 的局部放大曲线可以看出,F-P 标准具透射峰峰值波长随温度单调变化,通过数据处理提取相应峰值波长并进行线性拟合,得到拟合曲线的斜率为 $0.53\text{ }\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$,线性度为 0.999。将图 9 曲线头中尾三段放大,可以看出,激光器输出波长曲线中每个温度点的线性度较好,而且不同温度的测试曲线互相平行。对设定波长-输出波长曲线进行线性拟合,结果如表 1 所示,线性斜率相同,与理想值 1 很接近,截距整体变化 $11.05\text{ }\mu\text{m}$ 。对表 1 中截距-温度曲线进行拟合,可得到截距 b 随温度 T 变化的线性模型:

$$b = 0.1104 \times T - 2.68, \quad (1)$$

表明温度的变化只会导致响应曲线的平移,不影响斜率。当温度变化 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,F-P 标准具的透射光谱波长和激光器输出波长的漂移分别为 $53\text{ }\mu\text{m}$ 和 $11\text{ }\mu\text{m}$,其温度系数分别为 $0.53\text{ }\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$ 和 $0.11\text{ }\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$,F-P 标准具的温度稳定性相对较差。

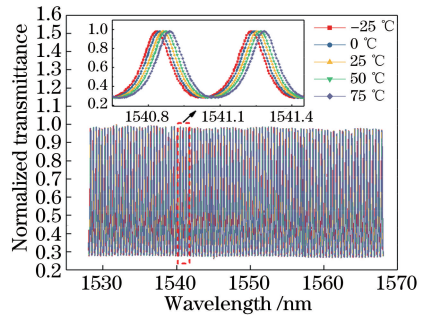


图 8 F-P 标准具的归一化透射光谱

Fig. 8 Normalized transmittance of F-P etalon

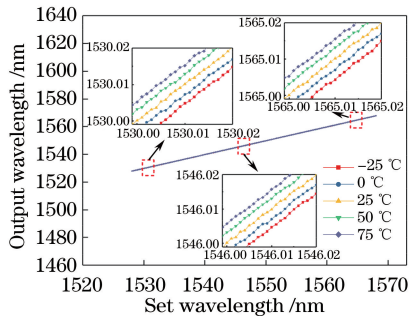


图 9 激光器设定波长-输出波长曲线

Fig. 9 Set wavelength-output wavelength of laser

表 1 设定波长-输出波长曲线的线性拟合结果

Table 1 Linear fitting results of set wavelength-output wavelength curves

Temperature / $^{\circ}\text{C}$	R^2	Slope	Intercept / μm
-25	0.99999	0.99999	-5.42
0	0.99999	0.99999	-2.73
25	0.99999	0.99999	0.15
50	0.99999	0.99999	2.77
75	0.99999	0.99999	5.63

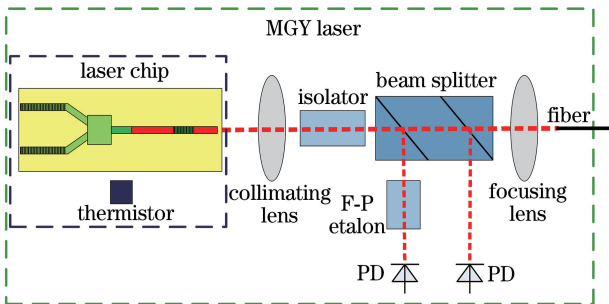


图 7 MGY 激光器封装后内部结构

Fig. 7 Internal structure of MGY laser after package

3 MGY 激光器高精度调谐方法及实验研究

3.1 高精度波长调谐方法

测试实验表明,由于 F-P 标准具温度稳定性较差,以它为基准在不同温度条件下难以获得高精度的激光波长。但激光器的输出波长与温度具有很好的线性关系,而且输出曲线的线性系数不变,只是截距随温度线性变化。基于实验测试结果,研究了基于标准乙炔气体吸收腔的高精度波长调谐方法。图 10 所示为乙炔气体吸收腔的 P 分支,其在 C 波段具有 20 多条强吸收谱线,这些吸收谱线的波长精度小于 $\pm 0.1 \text{ pm}$,且随温度的漂移小于 $0.01 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ^[16]。

图 11 所示为基于外部乙炔气体吸收腔(C2H2-12-2000, Wavelength References, 美国)的高精度波长调谐系统结构。激光器的输出光通过耦合器将一小部分光耦合到乙炔气室之后,由 PD 接收。在

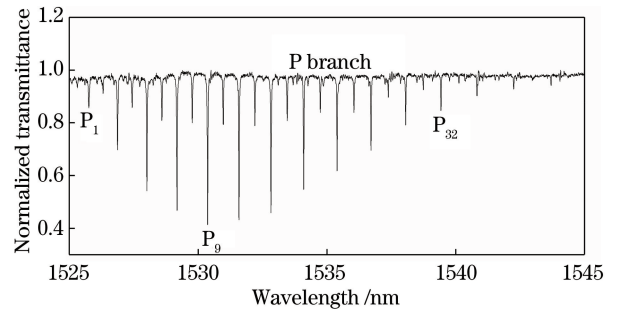


图 10 乙炔气体的吸收光谱

Fig. 10 Absorption spectrum of C_2H_2 gas

波长扫描时,通过采集 PD 的电流可以得到乙炔气体吸收腔的扫描光谱。取光谱中的 P_9 谱线作为绝对波长参考,对激光器输出的相对波长进行校准。2.4 节实验结果表明,在不同条件下,设定波长-输出波长直线互相平行,截距不同,因此只需要校准 P_9 位置的波长偏差,并以此直接校准截距,便可实现整个光谱范围的波长校准,校准周期为波长扫描周期的整数倍。

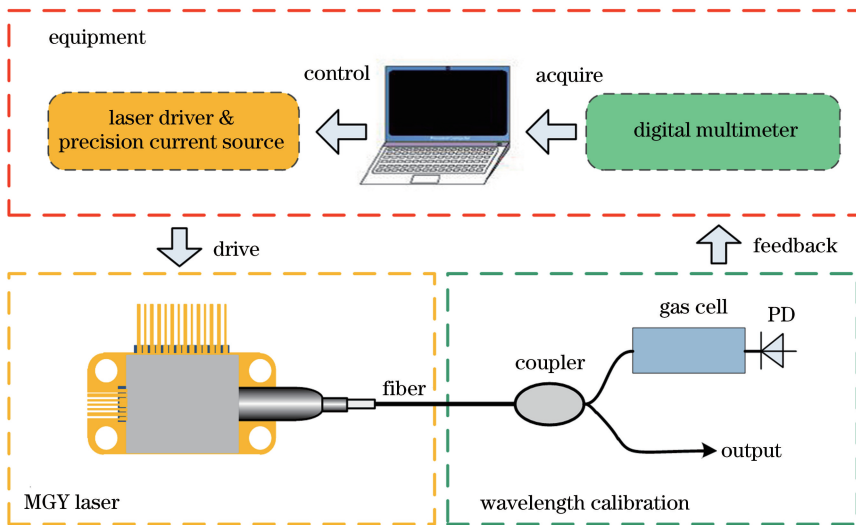


图 11 高精度波长调谐系统

Fig. 11 High precision and accuracy wavelength tuning system

基于图 11 所示的系统,对乙炔气体吸收腔的温度稳定性进行测试,测试结果如图 12 所示,将 P_9 参考谱线放大,在所设置的测试条件下,其谷值在 100°C 范围内没有变化,具有很好的稳定性。

3.2 高精度波长调谐实验研究

为了对高精度波长调谐系统的性能进行测试,在不同温度下进行波长调谐实验。实验时,将 MGY 激光器和乙炔气体吸收腔共同置于恒温箱中,控制温度从 -25°C 升至 $+75^\circ\text{C}$,步进为 25°C ,在每个温度点保温 2 h 后进行测试。在不同温度点下利用图 11 所示的高精度波长调谐系统控制

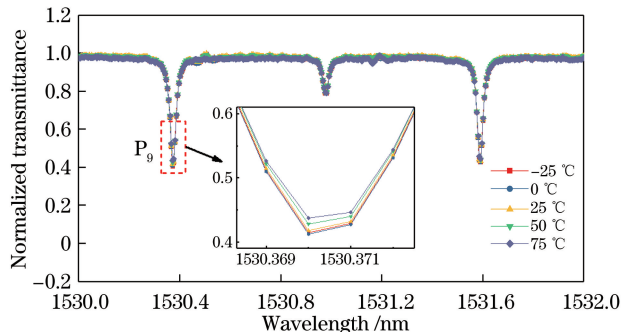


图 12 乙炔气体的吸收光谱

Fig. 12 Absorption spectra of C_2H_2 gas

MGY 激光器进行多次波长扫描和校准,得到各个温度点的平均扫描曲线,并将 25 °C 下经过校准后的扫描曲线作为标准曲线。图 13(a)所示为各个温度点下平均扫描曲线与标准曲线的偏差,图 13(b)所示为各个温度点下的精密度曲线和准确度曲线,可以看到,全温范围下系统的精密度为 0.18 pm,准确度为 0.12 pm。扫描激光器全温精密度优于常温下无吸收腔基准的指标。

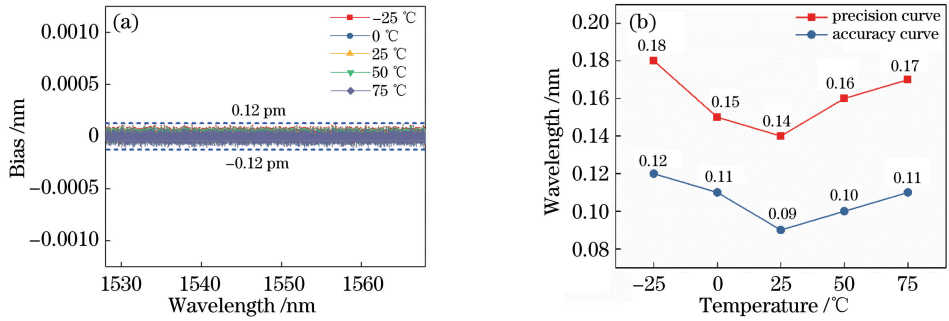


图 13 波长调谐实验结果。(a)扫描曲线与标准曲线的偏差;(b)精密度曲线和准确度曲线

Fig. 13 Experimental results of wavelength tuning. (a) Bias between scanning and standard curves; (b) precision and correctness curves

4 结 论

为满足光通信、光谱分析和光纤光栅解调等领域的高精度可调谐光源需求,搭建了 MGY 可调谐激光器高精度波长调谐系统,实现了粗扫描结合细扫描的高精度波长扫描标定,常温下系统的调谐精密度为 0.26 pm,调谐准确度为 0.2 pm。利用此系统测试考察了 MGY 激光器输出波长以及内置 F-P 标准具的温度漂移特性,发现 MGY 激光器输出激光波长与温度具有良好的线性关系,而且斜率不变,截距随温度线性变化;F-P 标准具的温度稳定性相对较差,不适合作为波长基准。在此基础上,研究了基于外部气体吸收基准的高精度波长校准方法,并进行温度实验测试。结果表明,在 -25 ~ +75 °C 温度范围内,40 nm 波长扫描范围内调谐曲线的线性度优于 0.9999,调谐波长精度优于 0.18 pm,准确度优于 0.12 pm。所搭建系统实现了扫描激光器在宽温度范围的高精准扫描,为工业应用提供了高精度且实用的激光基准。

参 考 文 献

[1] Coldren L A, Fish G A, Akulova Y, *et al.* Tunable semiconductor lasers: a tutorial [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 193-202.
 [2] Measures R M, Ohn M M, Huang S Y, *et al.* Tunable laser demodulation of various fiber Bragg grating sensing modalities [J]. *Smart Materials and Structures*, 1998, 7(2): 237-247.
 [3] Kan R F, Liu W Q, Zhang Y J, *et al.* Tunable diode laser absorption spectrometer monitors the ambient

methane with high sensitivity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(9): 1217-1220.
 阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱法监测环境空气中甲烷的浓度变化[J]. *中国激光*, 2005, 32(9): 1217-1220.
 [4] Cui W, Su J J, Jiang P P, *et al.* High-resolution multiplexed fiber Bragg grating wavelength interrogation system based on tunable LD[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(7): 0706003.
 崔巍, 苏建加, 姜培培, 等. 基于可调谐半导体激光器的高分辨率多路复用光纤光栅波长解调系统[J]. *光子学报*, 2016, 45(7): 0706003.
 [5] Li Z J, Chen W G, Ji Y, *et al.* Trace gas measurement method based on dual wavelength modulation of distributed feedback laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 111404.
 李志军, 陈伟根, 季焱, 等. 基于分布反馈激光器双波长调制的微量气体测量方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 111404.
 [6] Yan L S, Yi A L, Pan W, *et al.* A simple demodulation method for FBG temperature sensors using a narrow band wavelength tunable DFB laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(18): 1391-1393.
 [7] Wang Q, Guo J J, Chen W, *et al.* Widely tunable distributed feedback semiconductor lasers with constant power and narrow linewidth [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(1): 0101004.
 王琪, 郭锦锦, 陈伟, 等. 功率稳定且波长可调谐的窄线宽分布式反馈半导体激光器[J]. *中国激光*, 2017, 44(1): 0101004.
 [8] Larson M C, Akulova Y A, Coldren C W, *et al.* High performance widely-tunable SG-DBR lasers[J].

- Proceedings of SPIE, 2003, 4995: 66-81.
- [9] Xu Y B. Study of tunable semiconductor laser technology and its applications in the fiber optic sensing[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
徐迎彬. 扫描半导体激光器技术研究及在光纤传感中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [10] Wesstrom J O, Hammerfeldt S, Buus J, *et al.* Design of a widely tunable modulated grating Y-branch laser using the additive Vernier effect for improved super-mode selection [C]. IEEE International Semiconductor Laser Conference, 2002: 99-100.
- [11] Wesstrom J O, Sarlet G, Hammerfeldt S, *et al.* State-of-the-art performance of widely tunable modulated grating Y-branch lasers[C]. IEEE Optical Fiber Communication Conference, 2004: 389.
- [12] Isaksson M, Chacinski M, Kjebon O, *et al.* 10 Gb/s direct modulation of 40 nm tunable modulated-grating Y-branch laser [C]. Optical Fiber Communication Conference, 2005: OTuE2.
- [13] Müller M S, Hoffmann L, Bodendorfer T, *et al.* Fiber-optic sensor interrogation based on a widely tunable monolithic laser diode[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 59(3): 696-703.
- [14] Du Z H, Sui G H, Gao C. Research on SGDBR light source used in fiber Bragg grating interrogator[J]. Metrology & Measurement Technology, 2017, 37(6): 15-19.
杜泽翰, 隋广慧, 高超. 用于光纤光栅解调仪表的 SGDBR 光源研究[J]. 计测技术, 2017, 37(6): 15-19.
- [15] Finisar. Application note AN-2095: controlling the S7500 CW tunable laser [EB/OL]. (2011-11-09) [2018-10-16]. <https://www.finisar.com/communication-components/s7500>.
- [16] Jiang J F, He P, Liu T G, *et al.* Research of temperature-stable fiber Bragg grating sensing demodulation based on composite wavelength references[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1006005.
江俊峰, 何盼, 刘铁根, 等. 基于复合波长参考的温度稳定光纤光栅传感解调研究[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1006005.