

# 调制光栅 Y 分支激光器准连续调谐特性

刘强<sup>1</sup>, 荆振国<sup>1\*</sup>, 李昂<sup>2</sup>, 黄致远<sup>2</sup>, 彭伟<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>大连理工大学物理学院, 辽宁 大连 116024;

<sup>2</sup>大连理工大学光电工程与仪器科学学院, 辽宁 大连 116024

**摘要** 调制光栅 Y 分支(MG-Y)可调谐半导体激光器能够实现宽波长范围的快速调谐,有望成为光纤传感应用中最有发展前景的光源之一。为了满足光纤传感应用中对于精细波长准连续调谐的需求,提出了一种基于样条插值的 MG-Y 型激光器的自动化测试技术。该方案充分利用了 MG-Y 激光器的调谐特性,通过左、右光栅反射区电流的粗扫描获取覆盖 40 nm 范围的平滑的调谐路径。将每一条路径内的左右光栅反射区电流组合对应的线性调谐段进行去重拼接后,可实现目标波长的快速插值检索。通过对半导体光放大器的电流和相位区电流的双重校准,实现了激光器在不同输出波长下的平坦功率。利用该技术构建了覆盖 1527~1567 nm、波长间隔为 8 pm 的波长-电流查找表。该查找表的电流调谐路径平滑,功率波动小于 0.2 dBm,可用于需要进行快速光谱采集的光纤传感应用中。

**关键词** 激光器; 可调谐半导体激光器; 光纤传感; 自动化测试

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1206004

## Quasi-Continuous Tuning Characteristics of Modulated Grating Y-Branch Lasers

Liu Qiang<sup>1</sup>, Jing Zhenguo<sup>1\*</sup>, Li Ang<sup>2</sup>, Huang Zhiyuan<sup>2</sup>, Peng Wei<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup>School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

<sup>2</sup>School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

**Abstract** A modulated grating Y-branch (MG-Y) tunable semiconductor laser can achieve fast tuning in a wide wavelength range and is expected to become one of the most promising light sources in fiber optic sensing applications. In order to meet the demand for fine wavelength quasi-continuous tuning in fiber optic sensing applications, this paper proposes an automated test technique for MG-Y lasers based on spline interpolation. This scheme makes full use of the tuning characteristics of the MG-Y laser. A smooth tuning path covering the range of 40 nm is obtained by coarse scanning of the currents in the reflection areas of the left ( $I_{RR}$ ) and right ( $I_{LR}$ ) gratings. After the deduplication and stitching of the linear tuning sections corresponding to each  $I_{RR}$  and  $I_{LR}$  pair, fast interpolation retrieval can be realized. Through the double calibration of current of the semiconductor optical amplifier and current in the phase region, the flat laser powers at different output wavelengths are realized. Using this automated calibration technique, a wavelength-current look-up table covering 1527 nm to 1567 nm and with a wavelength interval of 8 pm is constructed. The look-up table has smooth current tuning paths and the power fluctuation is less than 0.2 dBm, which can be used in fiber optic sensing applications requiring fast spectrum acquisition.

**Key words** lasers; tunable semiconductor lasers; fiber optic sensing; automated test

**OCIS codes** 140.3460; 250.5960; 060.2370

## 1 引言

随着光纤传感技术的快速发展,基于不同原理和结构的光纤传感器已经相继成熟并进入工程应用<sup>[1-3]</sup>。其中光纤光栅传感器(FBG)<sup>[4]</sup>和外腔式法

珀干涉型传感器(EFPI)<sup>[5]</sup>最具代表意义,并获得了最广泛的工程应用。光纤传感系统的发展趋势是低成本、小型化和高分辨率。采用光谱仪构建的光纤传感系统,其结构简单,易于操作,但是成本较高,且难以获得高精细光谱信息。此外,受限於光谱采集

收稿日期: 2020-07-08; 修回日期: 2020-07-30; 录用日期: 2020-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(61727816,61520106013)、中央高校基本科研业务费专项资金(DUT18ZD215)

\* E-mail: jingzg@dlut.edu.cn; \*\* E-mail: wpeng@dlut.edu.cn

速度,该方案一般仅适用于低频参量的检测。随着半导体激光器技术的进步,基于可调谐半导体激光器构建的小型化光纤传感系统成为一种良好的选择。目前已广泛应用的可调谐半导体激光器包括分布式反馈激光器(DFB)、分布式布拉格反射(DBR)激光器和可调谐垂直腔表面发射激光器(VCSEL)等类型<sup>[6]</sup>。调制光栅 Y 分支(MG-Y)激光器是一种基于游标调谐原理的单片集成 DBR 激光器<sup>[7]</sup>,它具有波长调谐范围广( $> 40 \text{ nm}$ )、高边模抑制比(SMSR, $> 40 \text{ dB}$ )、快速波长切换( $< 20 \text{ ns}$ )和高输出功率( $> 10 \text{ dBm}$ )的特性。除了不适用于电信领域的密集波分复用<sup>[8]</sup>,MG-Y 的宽范围、快速可调谐特性使其在光纤传感领域有巨大的应用前景。近年来,Rohollahnejad 等<sup>[9-10]</sup>提出应用该激光器的离散波长调谐进行超短 FBG 解调和大规模复用。本研究团队也基于该激光器提出了用于干涉型光纤声传感器解调和复用的相移干涉技术<sup>[11-12]</sup>。构建覆盖  $40 \text{ nm}$  范围的波长-电流查找表是应用该激光器进行光纤传感的前提。郑胜亨和杨远洪<sup>[13]</sup>研究了 MG-Y 激光器的调谐特性,实现了  $\text{pm}$  级的波长-电流查找表构建。利用该方案采集大量数据集并进行波长排序后,以 SMSR 大小及附近有无跳变点为依据进行筛选,未考虑调谐路径是否平滑。在实际应用中,调谐电流的突变会不可避免地引起输出波长和功率的不稳定<sup>[14]</sup>,平滑的调谐路径将大幅提高连续波长扫描的稳定性。刘佳等<sup>[15]</sup>构建了覆盖  $40 \text{ nm}$ 、间隔为  $20 \text{ pm}$  的波长-电流查找表,并在此基础上搭建了 FBG 解调系统。该查找表未考虑功率校准,扫描光谱区间内的功率波动达  $4.5 \text{ dBm}$ 。

本文旨在研究 MG-Y 型激光器的准连续调谐特性,并在此基础上提出适用于光纤传感应用的 MG-Y 型激光器快速自动化测试技术。使用样条插值的方法快速获取目标波长对应的电流调谐数据,进而通过调用光波长计进行验证和反馈。本文通过减小大范围的电流扫描和目标波长筛选导致的时间消耗,简化波长-电流查找表构建流程。所构建的查找表电流调谐路径平滑,通过半导体光放大器(SOA)电流和相位区电流的双重校准实现平坦功率,该方法适用于高速准连续波长扫描应用。

## 2 MG-Y 激光器的调谐原理和自动化测试系统

多电极结构的 DBR 型可调谐半导体激光器主要利用载流子注入引起的等离子体效应来改变光栅

的有效折射率,进而改变激光器的输出波长。这种调谐方式的波长切换时间短,但是只能实现几个  $\text{nm}$  波长范围的调谐。MG-Y 激光器作为一种新型结构的 DBR 激光器,通过采用特殊的光栅设计并基于游标效应,能够获得宽波长调谐范围。本文采用 AOC Technologies 公司生产的 ATLS7500 型 MG-Y 激光器,其结构如图 1(a)所示,由左、右光栅反射区,多模干涉耦合器(MMI),相位区,增益区,集成前向反射器和 SOA 组成。左、右光栅反射区的反射谱是一种梳状反射谱,且间距不同。如图 1(b)所示,两个梳状反射谱对准的重合峰位置决定了某一时刻的输出波长。左、右光栅反射区的反射谱由左、右注入电流( $I_{\text{RR}}$  和  $I_{\text{LR}}$ )进行调谐, $I_{\text{RR}}$  和  $I_{\text{LR}}$  的联合控制可实现宽范围的波长粗调。相位区电流  $I_{\text{phase}}$  调谐可以控制输出光的相位谐振条件,从而实现精细的波长调谐。增益区电流  $I_{\text{gain}}$  和 SOA 电流  $I_{\text{SOA}}$  控制激光器的输出光功率。因此,每一个输出波长对应着 5 个注入电流的组合。对于电信领域的应用,波长间的信道间隔通常为  $50 \text{ GHz}(0.4 \text{ nm})$ ,这显然难以满足光纤传感领域精密光谱检测的需求。快速获取高质量的波长-电流查找表是利用 MG-Y 激光器进行光纤传感应用的前提。

MG-Y 激光器的调谐原理复杂,人工进行查找表检索的工作量非常大。因此,本文搭建了 MG-Y 激光器自动化测试系统。由于需要对 5 路注入电流进行复杂的组合调控,也需要对调控输出的波长进行实时判断(判断输出波长是否符合需求,进而指导后续的调控逻辑),采用单片机或者 FPGA 构建激光器驱动模块和测试系统将会增加系统复杂性。本文采用计算机作为主控单元进行 MG-Y 可调谐激光器自动化测试系统的构建。系统结构图见图 2,主要包括计算机、USB-SPI 模块、MG-Y 激光器驱动电路板和光波长计。

选用亚德诺半导体公司(Analog Devices Inc.)的 ADN8810 芯片开发激光器驱动电路。ADN8810 芯片是一种 12 bit 的电流源芯片,可提供高达  $300 \text{ mA}$  的可调输出电流。该电流源输出的电流范围宽,芯片噪声小,长期稳定性好,非常适合作为可调谐半导体激光器的驱动电流源。通过地址位进行区分时,一组 SPI 总线最多可以同时控制 8 块 ADN8810 芯片。在该系统中,通过一组 SPI 总线以串行方式控制 5 块 ADN8810 芯片分别作为左/右光栅反射区、相位区、增益区和 SOA 的电流源。单个 ADN8810 芯片输出的最大驱动电流为

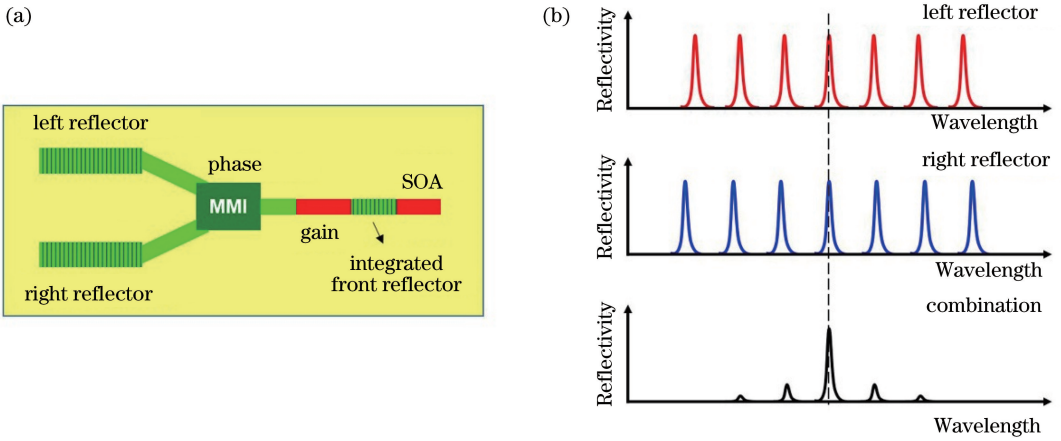


图 1 MG-Y 型可调谐激光器的结构和调谐原理。(a) 结构示意图；(b) 游标调谐原理

Fig. 1 Structure and tuning principle of MG-Y tunable laser. (a) Diagram of structure; (b) vernier tuning principle

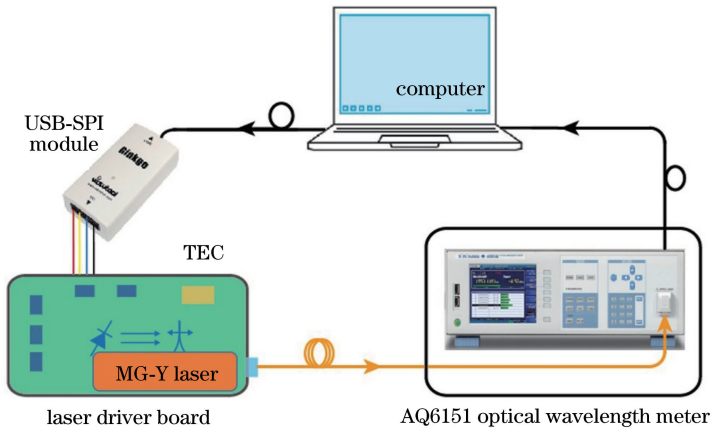


图 2 MG-Y 型可调谐激光器的自动化测试系统

Fig. 2 Automated test system of MG-Y tunable laser

$$I_{FS} \approx \frac{U_{REF}}{10 \times R_s}, \quad (1)$$

式中： $U_{REF}$  为输入 ADN8810 芯片的参考电压，在本文中为 4.096 V； $R_s$  为外接参考电阻值。输出驱动电流  $I_{OUT}$  可以表示为

$$I_{OUT} = \frac{C}{4096} \times \frac{U_{REF}}{R_s} \times \left( \frac{R_s}{15000} + 0.1 \right), \quad (2)$$

式中： $C$  为输入的控制数值，其范围为 0~4095。通过实际测试得到所构建的激光器驱动电路板上对应左/右光栅反射区、相位区、增益区和 SOA 的电流源的最大输出电流值分别为 34.600, 34.556, 8.500, 113.670, 171.400 mA。因此，该驱动电流板中 5 路电流源可实现的实际最小调谐电流分别为 0.008, 0.008, 0.002, 0.028, 0.042 mA。

基于 ViewTool 公司的 Ginkgo USB-SPI 适配器，上位机直接发送符合 SPI 协议的电流控制命令至激光器驱动电路板，这大幅度减小了电流控制的复杂性。USB-SPI 适配器输出三个信号至驱动电

路板，分别是数据串行接口 (SDI)，时钟 (SCLK) 和片选 (CS)。在 SCLK 的上升沿，SDI 的数据被送到移位寄存器中，当所有的 16 位数据 (4 位地址、12 位数据) 都送到寄存器后，CS 的高电平信号会使寄存器内的数据下载到对应的 ADN8810 芯片。通过温控模块控制激光器的工作温度保持在 25 °C。当目标控制电流发送成功后，上位机调用光波长计进行激光器输出波长、功率和光信噪比的检测。检测数据通过 TCP/IP 协议传输至计算机中形成检测闭环。所使用的 AQ6151 光波长计 (YOKOGAWA) 的波长检测范围为 1270~1650 nm，波长精度为 ±0.3 pm，波长显示分辨率为 0.0001 nm，功率显示分辨率为 0.01 dB，单次测量时间为 0.3 s，可满足 MG-Y 激光器快速自动化测试的应用需求。

### 3 基于样条插值的准连续调谐查找表构建

本文提出一种基于样条插值的快速自动化测试

方案,该方案可实现覆盖 1527~1567 nm 的 pm 级间隔的波长-电流查找表构建。以 8 pm (1 GHz) 间隔为例,详细说明该方案的具体实现方法。40 nm 波长调谐范围内共包含 5000 个波长点,该目标波长

数组已提前确定。该自动化测试方案流程图见图 3,整个测试过程主要分为 4 个部分:确定  $I_{RR}$  和  $I_{LR}$  的调谐路径;单个路径内目标波长的插值检索;输出功率校准;误差点优化。

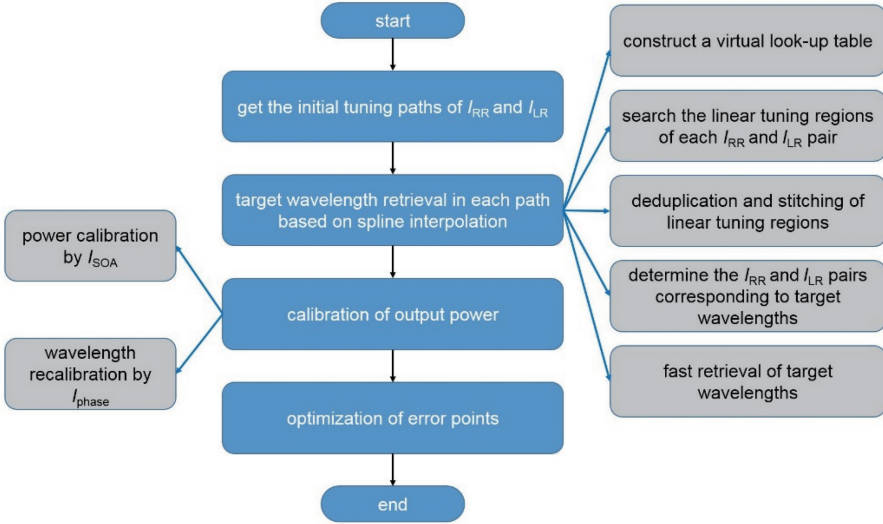


图 3 MG-Y 激光器的快速自动化测试流程图

Fig. 3 Flow chart of fast automated test scheme of MG-Y laser

### 3.1 确定左、右光栅反射区电流调谐路径

MG-Y 激光器的输出波长主要受左、右光栅反射区注入电流和相位区注入电流的控制,增益电流和 SOA 电流主要控制输出光功率。首先,增益电流和 SOA 电流分别为 98 mA 和 100.76 mA,相位区电流为 0 mA。为了获取覆盖 40 nm 范围的左、右光栅反射区电流调谐路径,以 0.2 mA 的电流步长、20 mA 范围进行  $I_{RR}$  和  $I_{LR}$  扫描,获得如图 4 (a)所示的电流-波长关系图。可以发现, MG-Y 激光器存在多个准连续波长调谐路径(不同颜色区分)。每一个准连续调谐路径可覆盖约 5 nm 的波

长范围,通过多个路径的去重拼接便能够实现 40 nm 宽范围波长调谐。处于色块边缘的输出波长容易出现跳模现象,为了提高输出稳定性、保持较高的光信噪比,调谐路径应该沿着每个色块的中心区域。结合电流-波长关系图和实际测试,筛选出覆盖 1527~1567 nm、间隔为 0.4 nm 的 100 个波长数据,共包含 11 段调谐路径。由图 4(a)可知,在同一路径内,左、右光栅反射区电流且呈现近似线性关系。由图 4(b)可发现,在单个路径内,输出波长和左、右光栅反射区电流呈现多项式关系。利用这些调谐特性进行样条插值,可快速获取高质量的波长-电流查找表。

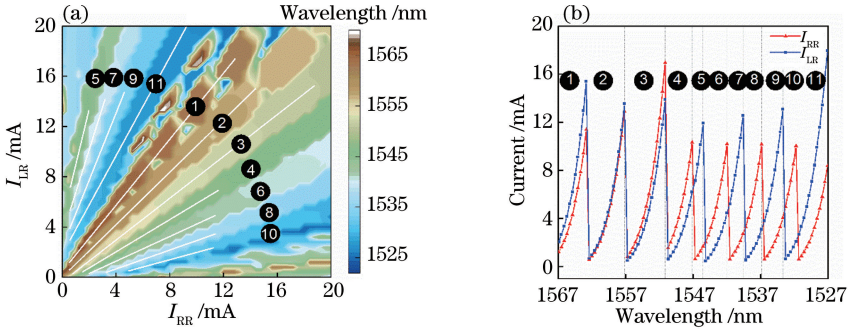


图 4 覆盖 40 nm 波长调谐范围的  $I_{RR}$  和  $I_{LR}$  的调谐路径。(a)输出波长与  $I_{RR}$  和  $I_{LR}$  的关系图;(b) 0.4 nm 波长间隔的左、右光栅反射区电流调谐路径

Fig. 4 Tuning paths of  $I_{RR}$  and  $I_{LR}$  covering wavelength range of 40 nm. (a) Relationship among output wavelength,  $I_{RR}$ , and  $I_{LR}$ ; (b) current tuning paths of  $I_{RR}$  and  $I_{LR}$  with 0.4 nm wavelength interval

### 3.2 样条插值的路径内目标波长检索

为了快速高效地获得精细的波长-电流查找表,首先采用样条插值的方法对获得的 0.4 nm 波长间隔的波长调谐路径进行插值细化,生成 0.05 nm 波长间隔的虚拟查找表。以路径 1 为例,对基于样条插值的精细波长检索方法进行详细说明。该路径共包含 11 种  $I_{RR}$  和  $I_{LR}$  组合,波长范围为 1563 ~ 1567 nm。图 5(a)显示了按照 0.05 nm 波长间隔进

行波长插值产生的  $I_{RR}$  数组。基于该  $I_{RR}$  数组,可以进一步进行样条插值,产生相对应的  $I_{LR}$  数组,如图 5(b)所示。至此,经过样条插值获得了 0.05 nm 间隔的路径 1 的左、右光栅反射区电流调谐路径,该路径内一共包含 88 种  $I_{RR}$  和  $I_{LR}$  组合。为了便于说明,将一对  $I_{RR}$  和  $I_{LR}$  称为一个特征点,需要在每个特征点位置上进行  $I_{phase}$  微调,实现波长的精细调谐。

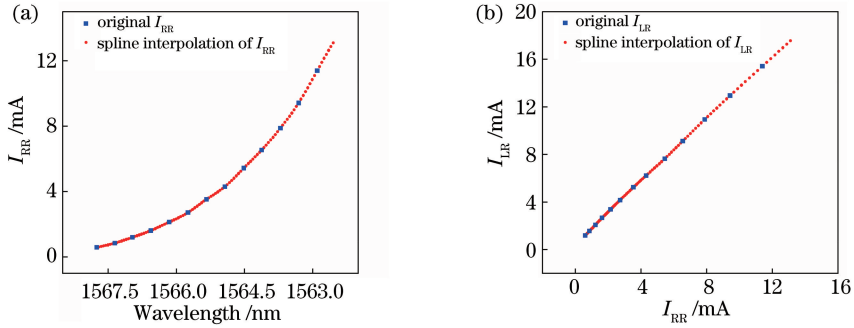


图 5 路径 1 的样条插值。(a)波长插值生成  $I_{RR}$  数组;(b)  $I_{RR}$  插值产生  $I_{LR}$  数组

Fig. 5 Spline interpolation of path 1. (a) Generating  $I_{RR}$  array through wavelength interpolation; (b) generating  $I_{LR}$  array through  $I_{RR}$  interpolation

图 6(a)显示了相位区电流调谐特性。对于路径 1 中的 2 个特征点,  $I_{RR}$  和  $I_{LR}$  组合分别为 (0.854, 1.560) 和 (3.008, 4.552) (单位为 mA), 相位区电流按照 0.1 mA 的步长进行 0~5 mA 范围的扫描。可以看出,通过 5 mA 相位区电流调谐,可实现约 0.3 nm 范围的波长精细调谐,并且出现多个线性调谐段。这是由于相位区电流是通过控制输出光的相位谐振条件实现波长调谐,当相位谐振条件超过一定范围时会发生波长跳变。图 6(a)中曲线的第 2 段线性调谐区域涵盖的可调谐波长范围宽,且对应的相位区电流区间也较大,这意味着可以有更多精细调谐的空间。此外,线性调谐段的中间区域(矩形框内区域)稳定性更高,即使发生相位区电流波动或者其他干扰,也不容易发生波长跳变,这是进行下一步精细波长调控的良好选择。

为了获得所获取的每一个特征点经  $I_{phase}$  调谐后的波长线性调谐区间,需要对每一个特征点位置进行相位区电流扫描。为了提高效率,以 0.2 mA 的步长进行扫描,且实时判断是否已获取该特征点的线性调谐段信息。假如探测到的第一段线性调谐段的相位区电流范围过窄 ( $I_{phase} < 1.7$  mA), 该线性调谐段会被舍弃,继续检索第二段线性调谐段。这样可以避免在每一个特征点都进行 5 mA 范围的扫描,当获取目标线性调谐段后,停止检索并进行下一

个特征点的  $I_{phase}$  扫描。与特征点对应的线性调谐段的  $I_{phase}$  值和对应的输出波长将会被单独记录在以该特征点序号命名的文件中,用于后续目标波长的插值检索。

对于相邻的多个特征点,如果把它们线性调谐段进行去除重合的拼接,便能够实现一段波长范围内的精细波长间隔的准连续调谐。图 6(b)显示了相邻的 7 个特征点对应的线性调谐段。本文所采用的相位区电流调谐区间去重合的逻辑是:将每一个线性调谐段的波长最小值和下一段的波长最大值进行取平均,将该平均值作为该段末尾值和下一段的起始值,如此可实现连续特征点相位区电流调谐区间的去重,且保留的部分基本都位于每一个线性调谐段的中间区域。对于 8 pm 波长间隔的目标波长数组中的任意一个波长值,都有唯一的特征点与其对应,在该特征点的线性调谐区间内进行相位区电流调谐便能够快速确定该波长的调谐电流组合。

以目标波长 1565.234 nm 为例,该目标波长位于图 6(b)中的第③号线性调谐段的中间区域,即图 6(a)中的矩形框选中区域内。为实现该目标波长的快速检索,将调用之前存储的该特征点线性调谐段数据,并通过样条插值产生该目标波长对应的相位区电流,如图 6(c)所示。上位机发送该目标波长插值产生的相位区电流至激光器驱动电路板,继而调

用 AQ6151 光波长计读取该相位区电流调节下的实际输出波长。若实际输出波长和目标波长的偏差小于 1 pm, 则认为检索成功, 将该查找表数据进行存储并继续下一个目标波长的检索; 若实际输出波长和目标波长的偏差不符合要求, 则将该相位区电流和它对应的实际输出波长存储到原始相位区电流线性调谐段文件中, 更新数据集, 根据更新后的数据集重新进行插值检索, 继续上述验证过程。数据集的实时更新会让样条插值更加精确, 同线性调谐段的其他目标波长也会在实时更新的数据集基础上进行插值检索。实际实验过程中, 绝大部分的目标波长仅需要 1

次样条插值就能够找到符合条件的电流调谐数据。

图 6(d) 显示了路径 1 的精细电流调谐曲线, 波长调谐范围为 1562.387~1567.001 nm, 波长间隔为 8 pm。由图可知, 基于该方案获取的查找表具有平滑的电流调谐路径, 即使是相位区电流调谐路径, 也较为平滑。将同样的方案应用于其他几个路径, 便能够实现全 C 波段 40 nm 范围的 8 pm 波长间隔的准连续调谐。基于该方案产生的波长-电流查找表中的相位区电流大多位于其所在线性调谐段的中间区域, 该方案不仅稳定性较高, 也给通过微调  $I_{\text{phase}}$  进行波长校准提供了可能。

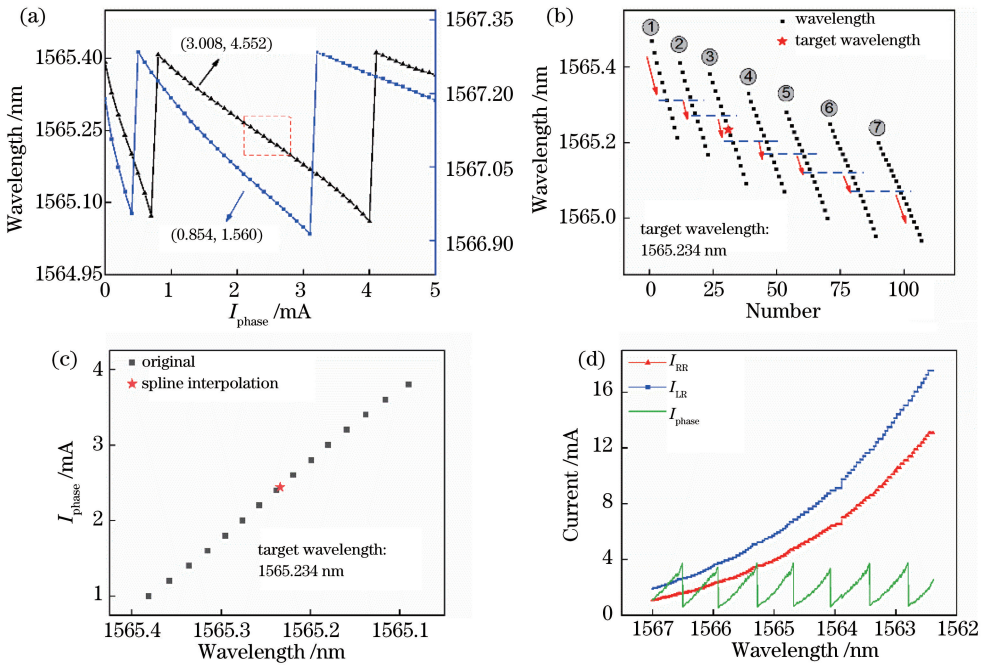


图 6 基于样条插值的目标波长检索。(a) 相位区电流调谐特性; (b) 线性调谐段的去重和拼接;

(c) 基于样条插值进行目标波长检索; (d) 8 pm 波长间隔的路径 1 的电流调谐曲线

Fig. 6 Target wavelength retrieval based on spline interpolation. (a) Tuning characteristics of current in phase region;

(b) deduplication and stitching of linear tuning sections; (c) target wavelength retrieval by spline interpolation;

(d) current tuning curves of path 1 with 8 pm wavelength interval

### 3.3 输出功率校准和误差点优化

经过 11 条路径的目标波长检索, 获得了覆盖全 C 波段、波长间隔为 8 pm 且调谐路径平滑的电流查找表。此时增益电流为 98 mA, SOA 电流为 100.76 mA, 其输出功率曲线见图 7(a)。随着左、右光栅反射区电流的增大, 注入载流子的吸收变大, 使得激光器输出光功率减小, 因而输出功率随左、右光栅反射区的电流变化呈现出锯齿状变化。在未进行功率校准时, 激光器输出功率的波动幅度为 1.0 dBm。如果不进行功率校准, 将会影响到光谱解调的准确性, 例如引起 FBG 波长的解调误差或者 EFPI 腔长的解调误差。在不添加额外参考光路的

情况下, 通过 SOA 电流的调谐, 可以使得激光器不同波长的输出光功率保持一致, 而这将会给光纤传感应用带来极大便利。图 7(b) 显示了 SOA 电流的调谐特性, 输出光功率与 SOA 电流呈现出较好的线性关系。然而, 在通过 SOA 电流调整输出功率的同时, 光波长也会发生漂移, 这增加了实现平坦功率的复杂性。由图 7(b) 可知,  $I_{\text{SOA}}$  在 98~128 mA 范围内变化时, 引起的波长偏移较小。根据多组  $I_{\text{SOA}}$  和光功率的线性拟合可以获得 SOA 电流调控功率的斜率值。本文将目标光功率设置为 10.5 dBm, 基于当前实际输出功率、 $I_{\text{SOA}}$  和先验的斜率值, 能够换算出产生目标功率对应的  $I_{\text{SOA}}$ 。上

位机控制发送该 SOA 电流指令,通过光波长计测量该情况下的输出波长和光功率。若功率误差大于 0.2 dBm,将继续进行插值筛选。当功率符合要求时,产生的微小的波长偏移将由相位区电流调谐进行校准。现有查找表中所采用的相位区电流大多数位于其所在波长线性调谐段的中间区域,具有一定范围

的波长校准空间,且不易出现波长跳变。经过  $I_{SOA}$  调谐校准光功率后,通过  $I_{phase}$  调谐校准光波长偏移,至此可以构建具有平坦功率输出的波长-电流查找表。经  $I_{SOA}$  校准后的光功率曲线如图 7(c)所示,此时光功率波动小于 0.2 dBm。校准后的 SOA 电流曲线和校准前的光功率曲线呈现出相反的变化趋势。

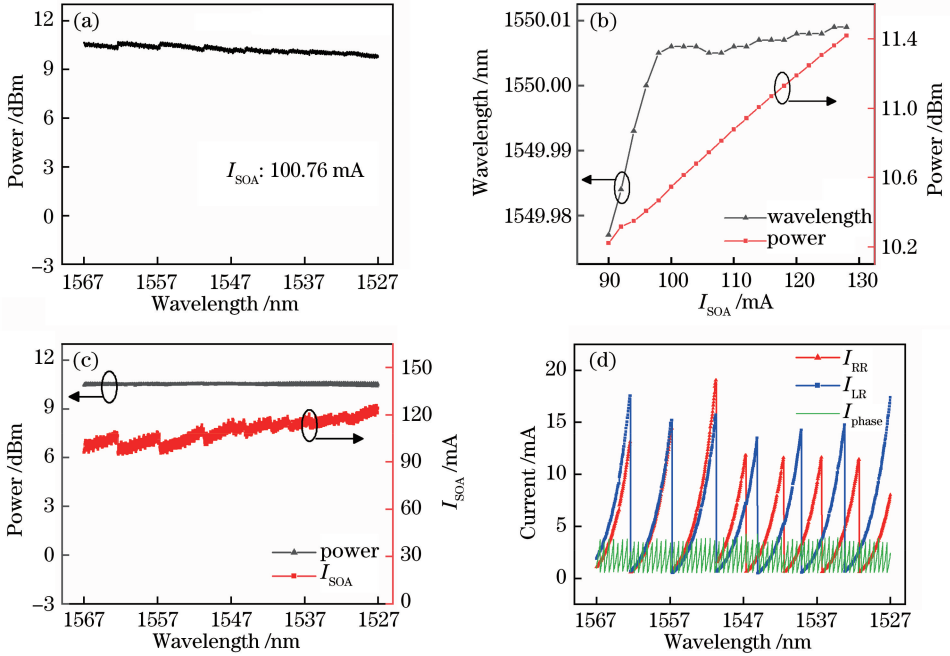


图 7 激光器输出功率校准。(a)  $I_{SOA}$  固定为 100.76 mA 时的激光器输出功率曲线; (b)  $I_{SOA}$  调谐特性;(c)校准后的功率曲线;(d)全 C 波段电流调谐曲线

Fig. 7 Calibration of output power of laser. (a) Output power curve of laser when  $I_{SOA}$  is fixed at 100.76 mA; (b) tuning characteristic of  $I_{SOA}$ ; (c) calibrated output power; (d) full C-band current tuning curves

至此,实现了 8 pm 波长间隔、1527~1567 nm 波长范围的波长-电流查找表构建。控制激光器按照此查找表进行多次输出验证,若出现波长误差大于 2 pm 的波长数据,则针对该波长进行进一步的筛选和优化。最终的电流调谐曲线如图 7(d)所示,在原有的 11 条平滑调谐路径内,通过样条插值的目标波长检索,可构建覆盖 40 nm 范围的波长-电流查找表。根据实际应用需要,基于该方法可实现更高波长精度的准连续调谐查找表构建。输出波长的精度主要受所使用的驱动电流源精度和激光器温控稳定性的影响。在本文中,激光器的工作温度稳定为 25 °C。使用 ADN8810 芯片作为电流源,能够满足 8 pm 间隔的波长准连续扫描的要求,波长误差可控制在 2 pm 之内。通过提高驱动电流源的精度,可以进一步细化波长-电流查找表的波长间隔,达到 1 pm 甚至 0.1 pm (~12.5 MHz) 的波长调谐间隔。

#### 4 EFPI 腔长解调实验

为了验证采用本文中的快速自动化测试方法构建的波长-电流查找表进行光纤传感的有效性,搭建了基于 MG-Y 激光器的光纤 EFPI 解调系统。解调系统的示意图见图 8,其采用 FPGA 作为主控芯片,并行控制 5 路 ADN8810 输出指定电流,实现 1527~1567 nm 的准连续波长扫描。波长切换时钟为 500 kHz,全谱扫描频率为 100 Hz。同步采集光电探测器在对应输出波长下的光信号强度,获取传感器干涉光谱。采用单模光纤-毛细管-单模光纤构建了一个静态 Fabry-Perot 腔,用于实验测试。传感器的干涉光谱如图 9(a)所示。采用交叉相关腔长解调算法<sup>[16]</sup>,可以解调出当前 EFPI 的腔长为 115.315 nm。由此可知,基于 MG-Y 激光器的准连续波长扫描,可以正常采集到 EFPI 干涉光谱。由于不同波长的输出功率已通过 SOA 电流校准到同

一水平,无需对所采集的干涉光谱进行光源原始光谱波形的校准,这简化了 EFPI 解调过程并且提高了解调准确性。在 100 Hz 的全光谱采集频率下,连续采集 300 组光谱数据,解调的腔长波动曲线如图 9 (b) 所示。解调结果的腔长波动大小为

1.4 nm,标准差(SD)为 0.2 nm,这证明了该系统可实现稳定的全光谱扫描和数据采集。另外,基于相同的波长-电流查找表,通过将 ADN8810 芯片替换为支持更高频率的电流源芯片,可以进一步提高波长切换速度,实现 MHz 波长切换。

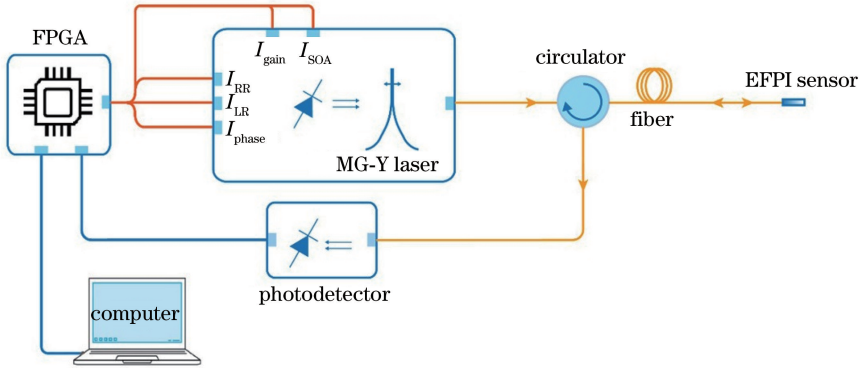


图 8 基于 MG-Y 激光器的光纤 EFPI 解调系统示意图

Fig. 8 Diagram of fiber-optic EFPI demodulation system based on MG-Y laser

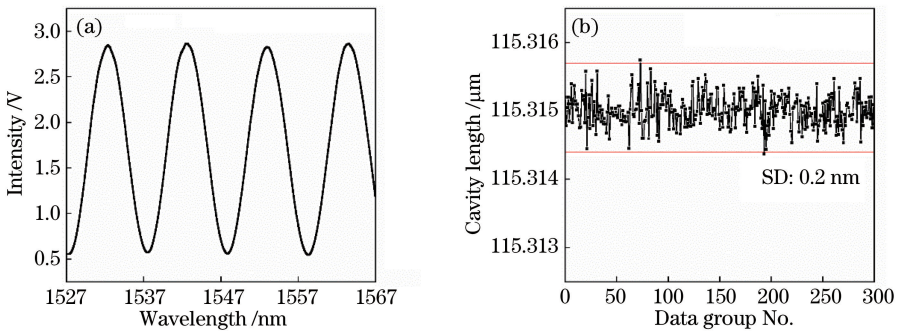


图 9 光纤 EFPI 解调结果。(a)干涉光谱;(b)解调腔长值

Fig. 9 Demodulation results of optical fiber EFPI. (a) Interference spectrum; (b) demodulated cavity length

## 5 结 论

基于 MG-Y 可调谐半导体激光器的准连续调谐特性,提出了一种 MG-Y 激光器的快速自动化测试技术。采用计算机、USB-SPI 模块、激光器驱动电路板和 AQ6151 光波长计搭建了自动化测试系统。该测试方案包含 4 个步骤:确定  $I_{RR}$  和  $I_{LR}$  调谐路径;单个路径内目标波长的插值检索;输出功率校准;误差点优化。样条插值的主动波长检索大幅减少了常规方案中采用精细电流扫描后进行波长筛选导致的时间消耗。基于该方案构建了覆盖 1527~1567 nm、波长间隔为 8 pm 的波长-电流查找表,该查找表中的电流调谐路径平滑,输出功率波动小于 0.2 dBm,可用于 EFPI 干涉光谱采集和绝对腔长解调。该工作为基于 MG-Y 激光器的高速波长扫描式光纤传感应用提供了良好的基础。

## 参 考 文 献

- [1] Li M, Yin J W. Fiber magnetic field sensing probe based on magnetic polymer thin film [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(11): 1106002. 李敏, 尹辑文. 基于磁性聚合物薄膜的光纤磁场传感探针 [J]. 中国激光, 2019, 46(11): 1106002.
- [2] Lu P, Lalam N, Badar M, et al. Distributed optical fiber sensing: review and perspective [J]. Applied Physics Reviews, 2019, 6(4): 041302.
- [3] Liu K, Weng L F, Jiang J F, et al. Zero-crossing rate based efficient identification of intrusion events in fiber perimeter security systems [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1106002. 刘琨, 翁凌峰, 江俊峰, 等. 基于过零率的光纤周界安防系统入侵事件高效识别 [J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1106002.
- [4] Campanella C, Cuccovillo A, Campanella C M, et al. Fibre Bragg grating based strain sensors: review of



- technology and applications [J]. *Sensors*, 2018, 18 (9): 3115.
- [5] Chen L H, Li T, Chan C C, et al. Chitosan based fiber-optic Fabry-Perot humidity sensor [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2012, 169: 167-172.
- [6] 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.
- [7] Wesström J-O, Sarlet G, Hammerfeldt S, et al. State-of-the-art performance of widely tunable modulated grating Y-branch lasers [C]//Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference, Feb. 22, 2004, Los Angeles, California: Optical Society of America, 2004: TuE2.
- [8] Fàbrega J M, Schrenk B, Bo F B, et al. Modulated grating Y-structure tunable laser for  $\lambda$ -routed networks and optical access [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17 (6): 1542-1551.
- [9] Rohollahnejad J, Xia L, Cheng R, et al. Fast and reliable interrogation of USFBG sensors based on MG-Y laser discrete wavelength channels [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 253-257.
- [10] Rohollahnejad J, Xia L, Cheng R, et al. TDM interrogation of intensity-modulated USFBGs network based on multichannel lasers [J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 670-680.
- [11] Liu Q, Jing Z G, Li A, et al. Common-path dual-wavelength quadrature phase demodulation of EFPI sensors using a broadly tunable MG-Y laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27873-27881.
- [12] Liu Q, Jing Z G, Liu Y Y, et al. Multiplexing fiber-optic Fabry-Perot acoustic sensors using self-calibrating wavelength shifting interferometry [J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38191-38203.
- [13] Zheng S H, Yang Y H. High precision and accuracy wavelength tuning characteristics of modulated grating Y-branch tunable lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0201001.  
郑胜亨, 杨远洪. 调制光栅 Y 分支可调谐激光器高精度波长调谐特性 [J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0201001.
- [14] Choi D H, Yoshimura R, Ohbayashi K. Tuning of successively scanned two monolithic Vernier-tuned lasers and selective data sampling in optical comb swept source optical coherence tomography [J]. *Biomedical Optics Express*, 2013, 4 (12): 2962-2987.
- [15] Liu J, Zhu L Q, He W, et al. Research on optical interrogation system based on MG-Y tunable diode laser [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(03): 87-96.  
刘佳, 祝连庆, 何薇, 等. 基于 MG-Y 型可调谐半导体光源的光纤光栅解调系统研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(03): 87-96.
- [16] Jing Z G. Study on white light extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor and its applications [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.  
荆振国. 白光非本征法布里-珀罗干涉光纤传感器及其应用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.