

## 调制光栅 Y 分支型激光器高效调谐特性研究

黄悒\*, 尤越, 张浩森, 邓传鲁, 胡程勇, 汪立森, 张小贝, 王廷云

上海大学特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200444

**摘要** 针对调制光栅 Y 分支型(MG-Y)激光器在实际应用中波长-电流查找表(LUT)构建效率低、调谐方式复杂、波长调谐时功率漂移量大等问题,对其调谐特性进行了深入研究。利用左、右反射器电流的调谐特性,设计出一种具有普适性的波长测试框架,能够高效且准确地定位激光器的平滑波长调谐路径。同时提出一种自适应功率校准算法,提升了激光器在波长调谐时的功率稳定性。测试结果表明:基于波长测试框架的LUT仅包含3147个反射器电流-波长组合;激光器的波长调谐范围为1528~1568 nm,波长调谐步长为5 pm;边模抑制比(SMSR)大于40 dB;波长准确度优于 $\pm 2.9$  pm;波长重复性优于1.9 pm;波长调谐时功率漂移量小于0.408 mW,稳定度为3.57%;解调出光纤非本征法布里-珀罗干涉型(EFPI)传感器的腔长变化量小于7.58 nm,可以应用于光纤传感等实际场景。

**关键词** 激光器; 半导体激光器; 波长调谐; 功率校准; 光纤传感

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230792

## 1 引言

随着二维材料<sup>[1]</sup>的快速发展,具有高功率、脉冲、窄线宽、可调谐等多种特性的半导体激光器<sup>[2]</sup>已经研制成功。其中,可调谐半导体激光器凭借其体积小、寿命长、波长切换灵活等优势<sup>[3-5]</sup>,被广泛应用于光纤通信<sup>[6-7]</sup>、光谱分析<sup>[8-9]</sup>以及光纤传感<sup>[10-11]</sup>等领域。可调谐半导体激光器分为分布式布拉格反射(DBR)激光器、分布式反馈激光器、可调谐垂直腔表面发射激光器和单片集成微环可调谐激光器等类型<sup>[12-13]</sup>。其中,调制光栅 Y 分支型(MG-Y)激光器是DBR激光器的分支,具有波长调谐范围(大于40 nm)广、波长切换时间(纳秒级别)短、边模抑制比(SMSR,大于40 dB)高等优势<sup>[14]</sup>。在光纤传感技术的探索历程中,基于MG-Y激光器构建的解调系统成为了重要的研究方向<sup>[15-17]</sup>。然而在实际应用中,构建波长-电流查找表(LUT)是应用该激光器的前提<sup>[18]</sup>。传统的LUT构建方法为反射器电流遍历扫描法,该方法效率较低,LUT中的无效数据量庞大,不利于定期校准,难以保证波长的准确度。此外,激光器在波长调谐时功率漂移量较大,易引入解调误差。因此,需要对MG-Y激光器的波长调谐方法进行研究并优化。

目前,许多学者针对半导体激光器的调谐特性和调谐方法展开了研究并取得了成果。Müller等<sup>[19]</sup>将MG-Y激光器的反射器电流等间隔划分并遍历扫描,得到了40 nm的波长调谐范围,调谐步长为5~10 pm。

郑胜亨等<sup>[20]</sup>在遍历扫描反射器电流的基础上,按SMSR大小进行排序,筛选出SMSR大于30 dB且无模式跳变的波长数据,波长调谐准确度为0.2 pm,波长精度为0.26 pm,但波长调谐路径不平滑。刘佳等<sup>[21]</sup>利用MG-Y激光器开发了光纤布拉格光栅(FBG)解调系统,将LUT中的波长数据按照“通道”进行拼接,定位出平滑的波长调谐路径,波长调谐步长为20 pm,波长准确度优于 $\pm 10$  pm。刘强等<sup>[22]</sup>提出一种基于样条插值的快速自动化波长测试方案,在保证MG-Y激光器波长调谐路径平滑的同时,通过调整半导体光放大器(SOA)电流,保证激光器在输出不同波长时功率漂移量小于 $\pm 0.2$  dBm,波长调谐步长为8 pm。以上研究均通过遍历扫描反射器电流来构建LUT,该方法工作量大、效率较低,且LUT中存在大量无效波长数据,不利于定期进行数据校准,难以保证波长准确度。任帅等<sup>[23]</sup>利用K近邻算法对MG-Y激光器LUT的构建方法进行优化,但优化后初始LUT中的波长数据依然高达54万个,LUT的构建效率仍需进一步提高。何伟奇等<sup>[24]</sup>针对取样光栅DBR激光器的波长调谐方法,设计出一种波长测试框架,LUT中的反射器电流-波长组合仅为4800个,波长准确度优于 $\pm 20$  pm,但该测试框架设计尚有缺陷,当驱动电流较小时,电流线性度较差。虽然以上研究改良了LUT的构建方法,但均没有校准激光功率,且激光器的调谐性能仍有待优化。

为了提升LUT的构建效率,提升MG-Y激光器波长调谐时的功率稳定性,本文对其调谐特性展开了研

收稿日期: 2023-05-04; 修回日期: 2023-08-04; 录用日期: 2023-09-05; 网络首发日期: 2023-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(61875116, 62027818)、上海市自然科学基金(22ZR1423000, 22010500100)

通信作者: \*huangyi1008@shu.edu.cn

究。首先,根据左、右反射器电流与波长的关系,设计了一种具有普适性的波长测试框架;其次,基于波长测试框架高效且准确地确定了平滑的波长调谐路径,并通过调节相位区电流,实现了波长细调谐功能;同时提出了一种自适应功率校准算法,保证激光器在波长调谐时功率也能保持相对稳定。

## 2 MG-Y 激光器的调谐特性研究

### 2.1 MG-Y 激光器的波长调谐原理

本文选用的激光器的标准工作温度为 25 °C,其内部带有半导体制冷器(TEC)模块和负温度系数热敏电阻,通过改变 TEC 模块正负两端的电流流向,可以实现激光器工作温度的调控。由于激光器对温度较为敏感,温度的变化不仅会影响输出波长的稳定性,也会影响输出功率的稳定性。为了后续调谐特性的研究,本文选择 Analog Devices 公司的 ADN8834 芯片作为温度控制芯片,并通过模拟比例-积分-微分控制方法来稳定激光器的工作温度<sup>[25]</sup>。MG-Y 激光器的结构示意图如图 1 所示,它将 DBR 激光器的单个反射器替换成左、右布拉格反射器和一个多模干涉(MMI)耦合器的组合,相位区和增益区与 MMI 耦合器相连,最终激光通过前反射器并由 SOA 放大后射出。该激光器同时受 5 路驱动电流控制,分别为布拉格反射器的注入电流( $I_{\text{left}}$  和  $I_{\text{right}}$ )、相位区电流( $I_{\text{phase}}$ )、增益区电流( $I_{\text{gain}}$ )以及半导体光放大器电流( $I_{\text{SOA}}$ )。MG-Y 激光器通过加法游标效应实现波长粗调谐,调节左、右布拉格反射器的注入电流  $I_{\text{left}}$ 、 $I_{\text{right}}$  可以改变该区域的载流子浓度,从而改变布拉格光栅的折射率,控制两个梳状反射谱的位置。当两个反射谱峰重合时,重合峰对应的波长即为激光器的输出波长<sup>[26]</sup>。

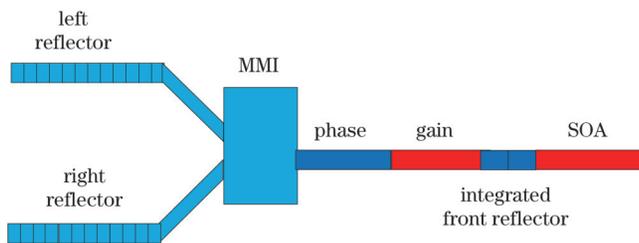


图 1 MG-Y 激光器的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of MG-Y laser

按照一定步长遍历扫描  $I_{\text{left}}$  和  $I_{\text{right}}$  后,可以获得图 2 所示的波长与反射器电流关系图,其中不同颜色的波长调谐区域为 MG-Y 激光器的波长调谐管道,简称“管道”。对于本文所使用的 MG-Y 激光器,共存在约 11 个“管道”,同一“管道”包含 3~6 nm 的波长调谐范围,且反射器电流越小,波长越大。相邻“管道”间存在明显的边界线,位于边界线区域的波长稳定性较差,易出现模式跳变,因此为了提升波长调谐时的稳定性,需保证  $I_{\text{left}}$ 、 $I_{\text{right}}$  均位于“管道”的中心区域。在实际应用中,

通常会沿着“管道”的中心线寻找反射器电流组合,此过程为平滑调谐路径,且称“管道”中心线为波长调谐路径。对于传统的 LUT 构建方式,首先需要按照一定步长遍历扫描  $I_{\text{left}}$ 、 $I_{\text{right}}$ ,再根据波长与反射器电流的关系图定位所有波长调谐路径,但此方法效率较低,LUT 中存在大量无效数据,波长准确度较低。因此,快速、准确地定位所有波长调谐路径是提高 LUT 构建效率的核心。

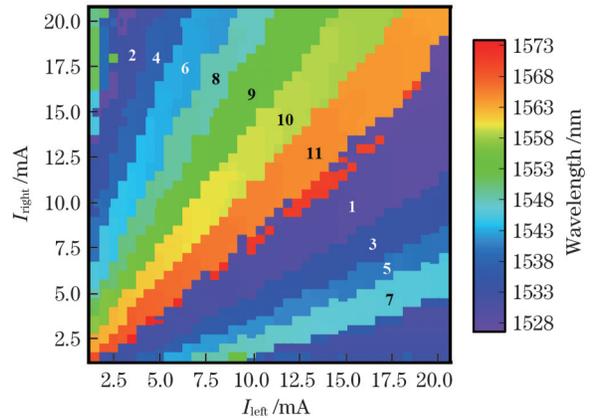


图 2 波长与反射器电流的关系

Fig. 2 Relationship among wavelength and reflector currents

### 2.2 MG-Y 激光器的波长测试框架

本文依据 MG-Y 激光器的波长调谐原理,设计了一种具有普适性的波长测试框架。在设计波长测试框架前,借助正交实验的思想<sup>[25]</sup>,按照“均匀分散、齐整可比”的设计策略,对 LUT 中庞大的数据组合进行筛选。 $I_{\text{left}}$ 、 $I_{\text{right}}$  可以看作是两个正交实验因子,其最大值均为 33 mA,若以 0.2 mA 为步长进行遍历扫描,则每个因子可以取到 165 个水平数,庞大的水平数是 LUT 传统构建方法效率低下的主要原因。为了解决这个问题,在 5~30 mA 范围内以 5 mA 为步长选取  $I_{\text{left}}$ 、 $I_{\text{right}}$  组合,共得到 36 个均匀分散的反射器电流分布位置,如图 3(a) 所示。在此基础上,设计波长测试框架的规则如下: 1) 沿着网格线扫描  $I_{\text{left}}$ 、 $I_{\text{right}}$  时,能够观察到单个“管道”的完整波长特性; 2) 沿着网格线扫描  $I_{\text{left}}$ 、 $I_{\text{right}}$  时,须尽可能观察所有“管道”的波长特性; 3) 由于  $I_{\text{left}}$ 、 $I_{\text{right}}$  较小时,输出波长的稳定性相对较差,故尽可能减小小电流时的网格线长度。鉴于这三条规则,设计出波长测试框架 A 和 B,分别如图 3(b)、(c) 所示,多条网格线共同组合成测试框架。经过对比分析,虽然测试框架 A 中单根网格线的电流扫描次数较小,但是总体网格线数量(共 12 条网格线)较多,且当反射器电流较大时,难以观察到所有“管道”的波长特性,不易对大电流时的波长调谐特性进行分析。而测试框架 B 避免了这些问题,并且可以避免反射器电流较小时波长不稳定的情况。综上所述,最终确定测试框架 B 为最终的波长测试框架。

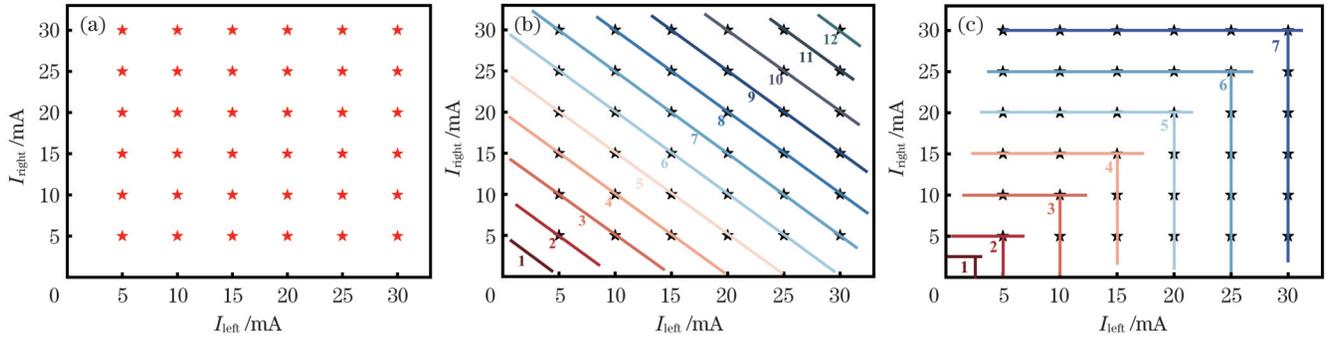


图3 波长测试框架。(a)反射器电流的分布;(b)测试框架A;(c)测试框架B

Fig. 3 Wavelength test frameworks. (a) Distribution of reflector current; (b) test framework A; (c) test framework B

### 2.3 基于波长测试框架的MG-Y激光器的波长调谐方法

确定波长测试框架后,沿着框架B中的7条网格线扫描  $I_{\text{left}}$ 、 $I_{\text{right}}$ ,步长为0.1 mA,并舍弃SMSR小于40 dB的波长数据。按照图3(c)中网格线3扫描  $I_{\text{left}}$ 、 $I_{\text{right}}$ ,波长和SMSR数据分别如图4(a)、(b)所示。由图4可知,当其中一个反射器电流固定不变,按照网格线扫描另一个反射器电流时,波长呈“阶梯”状变化,每一个“阶梯”均对应图2中的一个“管道”,而每一个“阶梯”中点的波长数据则对应着“管道”中心线的波长数据。

SMSR呈“锯齿”状变化,由于非线性增益的影响,SMSR峰值会向低电流方向偏移<sup>[27]</sup>。总体来看,大部分“阶梯”所对应的SMSR均大于40 dB,光谱质量符合要求,对于个别不符合要求的数据,如图4(b)中的“阶梯5”,是其所在管道过于狭窄所致,为了不影响波长调谐的稳定性,通常需要舍弃。7条网格线全部扫描完毕后,共获得1732个反射器电流-波长组合,将同一个“管道”所对应的“阶梯”的7个中点依次线性连接,便得到了平滑的波长调谐路径,如图5所示,拼接所有波长调谐路径,获得完整的波长调谐范围。

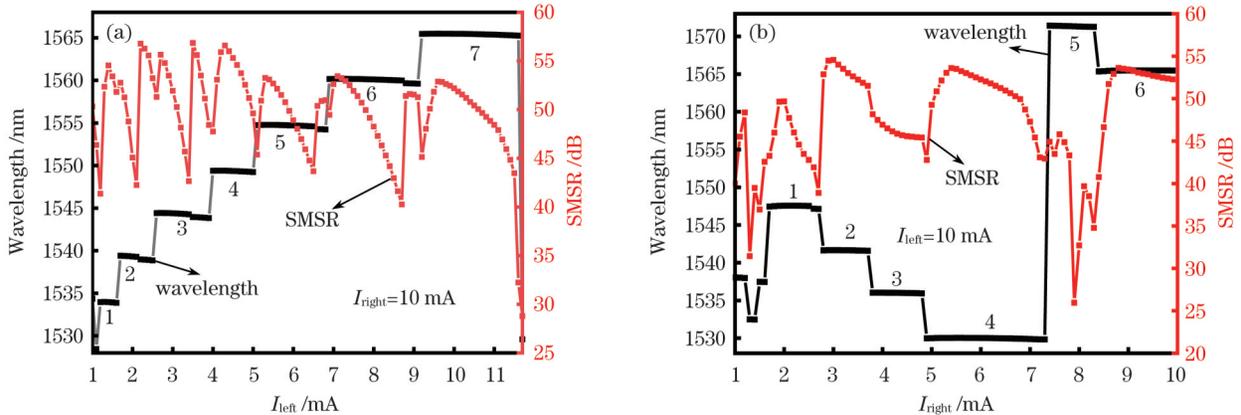
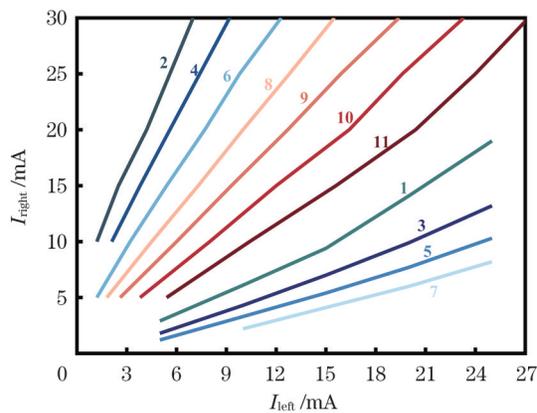
图4 沿着网格线3扫描得到的波长和SMSR数据。(a)扫描  $I_{\text{left}}$ ,固定  $I_{\text{right}}$ ;(b)扫描  $I_{\text{right}}$ ,固定  $I_{\text{left}}$ Fig. 4 Wavelengths and SMSRs obtained by scanning along grid line 3. (a) Scanning  $I_{\text{left}}$  and fixing  $I_{\text{right}}$ ; (b) scanning  $I_{\text{right}}$  and fixing  $I_{\text{left}}$ 

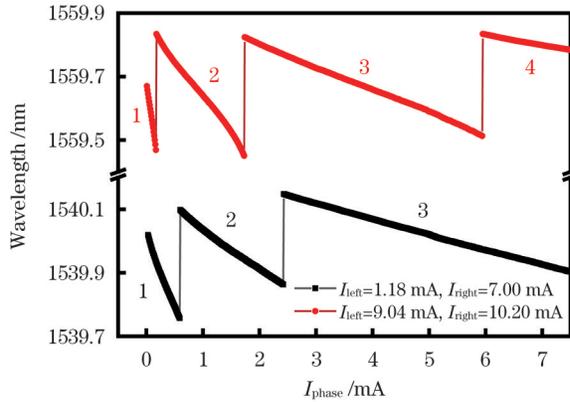
图5 波长调谐路径

Fig. 5 Wavelength tuning paths

沿着11条波长调谐路径扫描  $I_{\text{left}}$ 、 $I_{\text{right}}$ ,规定两个反射器电流的最小调节步长为0.1 mA,同时记录不同反射器电流对应的波长,并舍弃SMSR小于40 dB的数据。须保证扫描全部波长调谐路径后,激光器的波长调谐范围大于等于40 nm,且待拼接的两条调谐路径所对应的起始、截止波长应首尾相连或有所重叠,否则须重新对测试框架进行调整,直至40 nm的波长范围均被覆盖。至此,初始LUT构建完毕,此时LUT仅包含3147个反射器电流-波长组合。相较于传统的LUT构建方法,基于波长测试框架的LUT构建的效率大幅提升,同时避免了大量无效数据,有利于后期数据校准。

最后,利用MG-Y激光器的相位区电流  $I_{\text{phase}}$  实现

波长的精细调谐功能,规定 MG-Y 激光器的波长调谐步长为 5 pm。相位区电流  $I_{\text{phase}}$  用于调整光在相位截面中传输的延迟,通过改变腔模式可为激光器提供额外 0.3 nm 左右的波长连续调谐范围,调谐精度最小为 1~2 pm。当  $I_{\text{phase}}$  增大时,激光通过相位截面时的相移会减小,波长蓝移,若持续增大  $I_{\text{phase}}$ ,则波长将呈现周期性变化的规律, $I_{\text{phase}}$  的调谐特性如图 6 所示。当  $I_{\text{left}} = 9.04 \text{ mA}$ ,  $I_{\text{right}} = 10.20 \text{ mA}$  时,  $I_{\text{phase}}$  在 7.5 mA 的范围内共有 4 个波长线性调谐区域,选择波长覆盖范围大于 0.2 nm、线性度较好且波长变化最平缓的区域作为波长精细调谐区,对应图 6 中第 3 个线性调谐区域。在此调谐区域内,  $I_{\text{phase}}$  每增大 0.01 mA, 波长约蓝移 1 pm, 因此,为实现 5 pm 的调谐步长,需要将  $I_{\text{phase}}$  增大 0.05 mA。

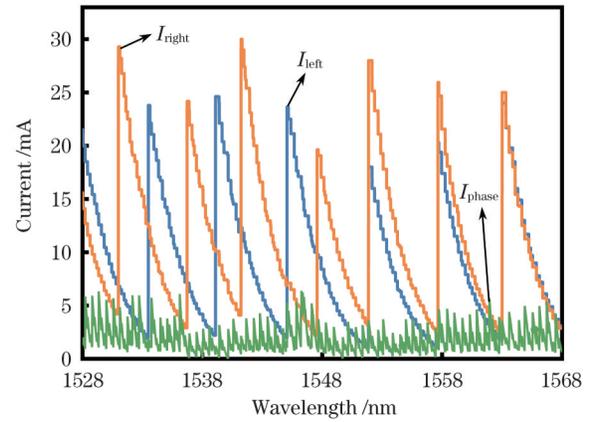
图 6  $I_{\text{phase}}$  的调谐特性Fig. 6 Tuning characteristic of  $I_{\text{phase}}$ 

波长精细调谐的具体步骤如下:首先,将 LUT 中的波长数据按照从大到小的顺序进行排序;其次,规定激光器输出波长的最大值和最小值,最大值应略大于 1568 nm,最小值应略小于 1528 nm(本文设定的 LUT 最终范围为 1528~1568 nm),并设置最大波长对应的  $I_{\text{left}}$ 、 $I_{\text{right}}$ 、 $I_{\text{phase}}$ ,以 0.01 mA 为步长调节  $I_{\text{phase}}$ ,使波长以 5 pm 为步长蓝移,直至波长发生跳变,此时说明  $I_{\text{phase}}$  已进入下一个线性调谐区域,记录跳变前的输出波长为  $\lambda_1$ ;接着,确定与  $\lambda_1$  最接近的波长所对应的  $I_{\text{left}}$  和  $I_{\text{right}}$ ,调节  $I_{\text{phase}}$  使波长为  $\lambda_2$ ,且  $\lambda_2$  比  $\lambda_1$  小 5 pm;以此类推,直至最终得到共 8001 个波长数据。

最终, MG-Y 激光器的调谐范围为 1528~1568 nm, SMSR 均大于 40 dB,调谐步长为 5 pm,初始 LUT 中反射器电流-波长组合为 3147 个,最终 LUT 中的波长数据为 8001 个,整个 C 波段的  $I_{\text{left}}$ 、 $I_{\text{right}}$  以及  $I_{\text{phase}}$  调谐曲线如图 7 所示。

#### 2.4 自适应功率校准算法

当 MG-Y 激光器进行波长调谐时,随着  $I_{\text{left}}$ 、 $I_{\text{right}}$  的增大,左、右布拉格反射器的载流子吸收浓度增加,激光器的输出功率减小<sup>[28]</sup>。在波长调谐时,  $I_{\text{left}}$ 、 $I_{\text{right}}$  呈现周期非线性变化规律,如图 7 所示,因此输出功率会发生漂移,这会影响光谱的解调精度,当输出功率较大

图 7 C 波段  $I_{\text{left}}$ 、 $I_{\text{right}}$  以及  $I_{\text{phase}}$  的调谐曲线Fig. 7 C-band tuning curves of  $I_{\text{left}}$ ,  $I_{\text{right}}$ , and  $I_{\text{phase}}$ 

时,甚至会缩短激光器的使用寿命。此外, MG-Y 激光器的敏感性较高,易受温度和驱动电流的影响,在进行波长调谐时,输出功率易产生波动,因此本文提出了一种自适应功率校准算法,流程图如图 8 所示,其中  $I_{\text{left}k}$ 、 $I_{\text{right}k}$ 、 $I_{\text{phase}k}$  分别表示第  $k$  组电流组合中的  $I_{\text{left}}$ 、 $I_{\text{right}}$ 、 $I_{\text{phase}}$ ,  $I_{\text{SOA}k+1}$  表示第  $k+1$  组电流组合中的  $I_{\text{SOA}}$ ,  $\lambda_k$  表示第  $k$  组电流对应的波长,  $\lambda^*$  表示参考波长,  $i$  表示循环次数。

在 MG-Y 激光器的 5 个驱动电流中,增益区电流  $I_{\text{gain}}$  和半导体光放大器电流  $I_{\text{SOA}}$  均可以调整输出功率,但由于  $I_{\text{SOA}}$  与输出功率的线性拟合度远大于  $I_{\text{gain}}$ <sup>[29]</sup>,因此固定  $I_{\text{gain}}$  为 98 mA,仅通过调节  $I_{\text{SOA}}$  改变激光器的输出功率。MG-Y 激光器的第 7 引脚(PD.ref)是参考光电二极管的阳极,该引脚会输出反相参考电流( $I_{\text{PD.ref}}$ ),该电流与输出功率呈正比例关系,因此采用内环电流反馈的方法进行功率校准。 $I_{\text{PD.ref}}$  经过电流/电压转换电路后被反相放大为功率反馈电压  $U_{\text{PD.ref}}$ ,并输入至主控制器(ARM)内部的模数转换器进行采样,上位机根据采样到的  $U_{\text{PD.ref}}$  对激光器进行功率校准。

自适应功率校准算法的步骤如下:首先确定标准输出功率所对应的功率反馈电压  $U_{\text{PD.ref}}^*$ ,固定  $I_{\text{SOA}}$  不变,将 MG-Y 激光器设置为调谐模式,此时可以采集到功率校准前扫描整个 C 波段时共 8001 个采样点的功率反馈电压  $U_{\text{PD.ref}k}$  ( $k=1, 2, \dots, 8001$ ),  $U_{\text{PD.ref}}$  与激光器输出功率呈线性关系。由于模数采样器存在误差,规定  $U_{\text{PD.ref}k}$  的最大变化幅度为  $U_{\text{PD.ref}}^* \pm 0.01 \text{ V}$ ,若超出该范围,则需要校准功率。由于  $U_{\text{PD.ref}k}$  和  $I_{\text{SOA}k}$  均与功率呈线性关系,利用  $U_{\text{PD.ref}k}$  与  $U_{\text{PD.ref}}^*$  的差值计算当前时刻的输出功率偏差量,并通过调节  $I_{\text{SOA}}$  校准输出功率。重复上述步骤多次,直至确认所有需要进行功率校准的数据。然而,调整  $I_{\text{SOA}}$  也会改变激光器的输出波长,规定功率校准后输出波长与标准波长的偏差值最大为 5 pm,否则须进一步调节相位区电流的校准波长。根据以上步骤,可以得到 8001 个波长点功率校准后所对应的  $I_{\text{SOA}k}$ 。在实际应用中,受到环境因素影响,功率漂移量会增大,规定在激光器波长调谐的过程中,当第  $k$

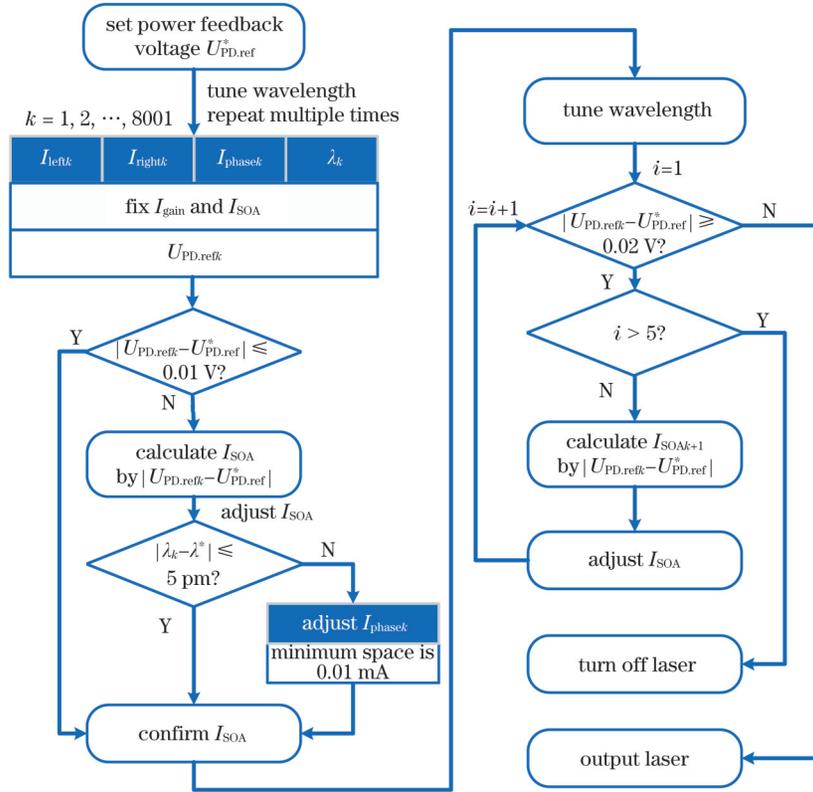


图 8 功率校准流程图

Fig. 8 Flow chart of power calibration

次模数采样得到的  $U_{PD.refk}$  与  $U_{PD.ref}^*$  差的绝对值大于  $0.02\text{ V}$  时, 第  $k+1$  次设置的  $I_{SOAk+1}$  则根据  $U_{PD.refk}$  与  $U_{PD.ref}^*$  的差值进行自适应补偿。若调节 5 次  $I_{SOA}$  后, 激光功率仍不在指定稳定区间内, 则关闭激光器。至此, 完成自适应功率校准算法设计。

### 3 MG-Y 激光器的调谐性能测试

#### 3.1 测试系统搭建

图 9(a)、(b) 分别为 MG-Y 激光器调谐性能测试系统和光纤非本征法布里-珀罗干涉型 (EFPI) 腔长解调系统。其中, PC 为计算机, PD 为光电探测器, AD8620

为双通道运算放大器, ADN8810 为可编程电流芯片, 调谐性能测试系统主要由积分球探头 (S145C)、光功率计 (PM400)、布拉格光纤光栅分析仪 (FBGA)、光谱仪 (AQ6370D) 等设备组成。输出激光经 S145C 探头进入 PM400 光功率计, S145C 探头可探测的功率范围为  $10\text{ }\mu\text{W}\sim 20\text{ W}$ , 最小分辨率为  $1\text{ nW}$ ; 使用 FBGA 模块测量激光器的波长, FBGA 可检测  $1510\sim 1590\text{ nm}$  的激光, 分辨率为  $1\text{ pm}$ , 最小可检测  $\pm 1\text{ pm}$  的波长变化; 激光光谱由 AQ6370D 扫描采集, 设置其扫描分辨率为  $20\text{ pm}$ , 采样点间隔为  $1\text{ pm}$ 。光纤 EFPI 腔长解调系统主要包括示波器、光电探测器等设备。

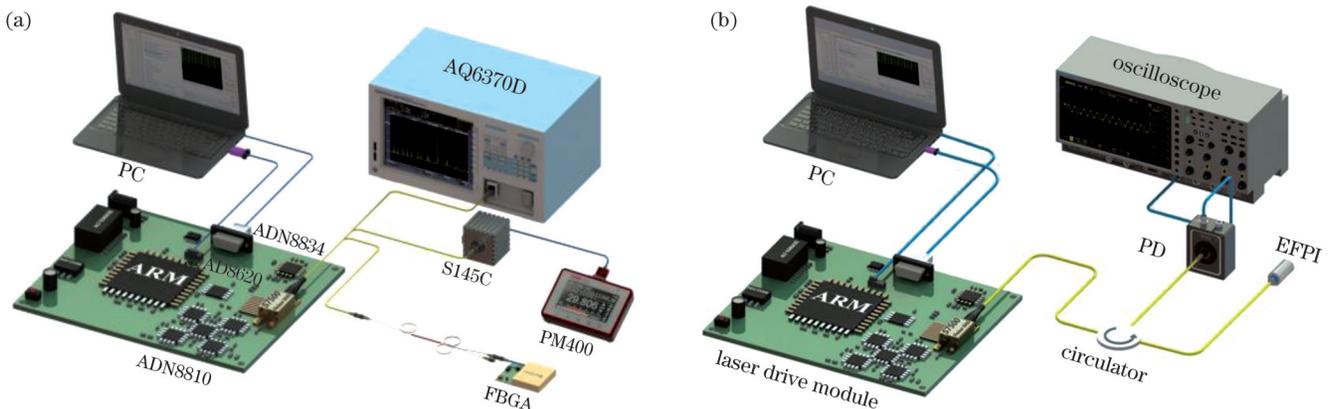


图 9 MG-Y 激光器测试系统。(a) 波长稳定性和重复性测试系统; (b) 光纤 EFPI 腔长解调系统

Fig. 9 Test systems of MG-Y laser. (a) Wavelength stability and repeatability test system; (b) fiber EFPI cavity length demodulation system

### 3.2 波长准确度和重复性测试

为验证优化后 MG-Y 激光器波长调谐方法的准确性和有效性,首先对波长的准确度进行测试。将激光器预热 30 min 后,在室温环境下规定激光器以 5 pm 为步长从 1528 nm 调谐至 1568 nm,共计 8001 个波长点,同时利用光谱仪 AQ6370D 对光谱和输出波长进行同步采样,波长准确度测试结果如图 10 所示。通过光谱仪观察到光谱质量良好,没有出现 SMSR 小于 40 dB 或波长跳变的现象。测试结果表明,实际波长与设定波长的偏差量均小于  $\pm 2.9$  pm,标准差为 0.726 pm,当波长调谐步长设定为 5 pm 时,输出波长也呈现出良好的线性度,拟合度  $R^2=0.99993$ 。

测试波长准确度满足要求后,对 MG-Y 激光器输出波长的重复性也进行了测试。为提高测试效率,以 5 nm 的调谐步长为例,连续调谐 1530~1565 nm 共 30 次,使用 FBGA 模块测得的波长数据如表 1 所示。

表 1 连续调谐时的波长重复性

Table 1 Wavelength repeatability while continuous tuning

Wavelength /nm	Maximum drift /pm	Minimum drift /pm	Wavelength /nm	Maximum drift /pm	Minimum drift /pm
1530	1.7	0.7	1550	1.9	0.6
1535	1.4	0.4	1555	1.0	0.4
1540	1.9	0.8	1560	1.6	0.7
1545	1.8	0.8	1565	1.7	0.7

以上测量结果证明了 MG-Y 激光器在波长调谐时具有较好的波长准确度和重复性,也进一步验证了优化后波长调谐方法的准确性,在提高波长-电流 LUT 构建效率的同时也能发挥 MG-Y 激光器优秀的调谐性能。

### 3.3 波长调谐时的功率稳定度测试

采用积分球探头 S145C 和光功率计 PM400 对 MG-Y 激光器的输出功率进行测量。激光器预热时间为 30 min,波长调谐范围为 40 nm,规定激光器的标准功率反馈电压  $U_{PD.ref}^*$  为 1.3 V,对应输出功率约为 11.446 mW,功率校准前后的变化量如图 11 所示。校准前,扫描一次 C 波段时功率漂移量高达 2.382 mW,稳定度为 20.69%;校准后,功率漂移量最大仅为 0.408 mW,稳定度为 3.57%。结果表明,校准后 MG-Y 激光器在波长调谐时的输出功率稳定度大幅提升,自适应功率校准算法起到了良好的控制效果。定义稳定度(S)为

$$S = \frac{\Delta X}{\bar{X}}, \quad (1)$$

式中: $\Delta X$ 为最大波动量; $\bar{X}$ 为平均值。

### 3.4 光纤 EFPI 腔长解调实验

通过光纤 EFPI 腔长解调实验验证优化后波长调谐方法的准确性、有效性以及 MG-Y 激光器调谐性能的优越性。MG-Y 激光器被设置为连续扫描模式,波长扫描范围为 1528~1568 nm,波长调谐步长为 5 pm,

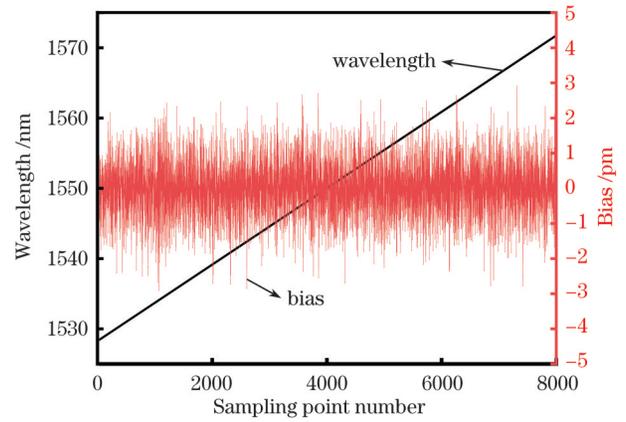


图 10 波长准确度

Fig. 10 Accuracy of wavelength

示。波长连续调谐 30 次后,同一波长下的漂移量最大仅为 1.9 pm,最小为 0.4 pm,波长没有跳变,重复性较好。

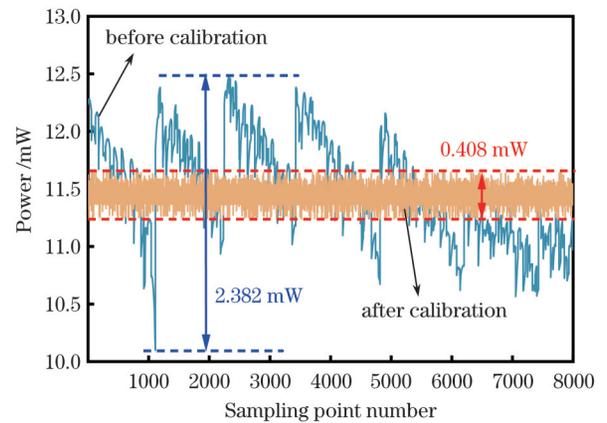


图 11 波长调谐时的功率稳定度

Fig. 11 Stability of power while wavelength tuning

波长切换时间设置为  $10 \mu\text{s}$ ,全谱扫描时间为 80 ms。MG-Y 激光器输出的激光经过环形器后被输送至法布里-珀罗腔中进行干涉,EFPI 光信号通过环形器进入光电探测器被转换为电信号后,由示波器进行采样,采样率设置为  $1 \text{ M Sa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。基于 MG-Y 激光器解调得到的 EFPI 光谱如图 12(a) 所示。EFPI 腔长计算方法<sup>[30]</sup>为

$$L = \frac{\lambda^2}{2n \cdot R_{FSR}}, \quad (2)$$

式中: $L$ 为 EFPI 传感器的腔长; $n$ 为 EFPI 传感器中介质的折射率; $\lambda$ 为激光器输出波长; $R_{FSR}$ 为 EFPI 光谱

的自由光谱范围,具体指干涉光谱中两个波峰或波谷的间距。根据式(2),计算出的EFPI传感器的腔长约 为 104.583  $\mu\text{m}$ 。为了验证解调系统的稳定性,在同一环境下,利用MG-Y激光器重复扫描C波段,并连续采集 300 组干涉光谱数据,解调出的EFPI传感器的腔长

误差如图 12(b)所示,由计算结果可知腔长平均值为 104.581  $\mu\text{m}$ ,最大变化量为 7.58 nm,标准差为 1.60 nm。结果验证了优化后波长调谐方法的准确性和有效性, MG-Y 激光器在实际应用中也能发挥出优秀的调谐性能。

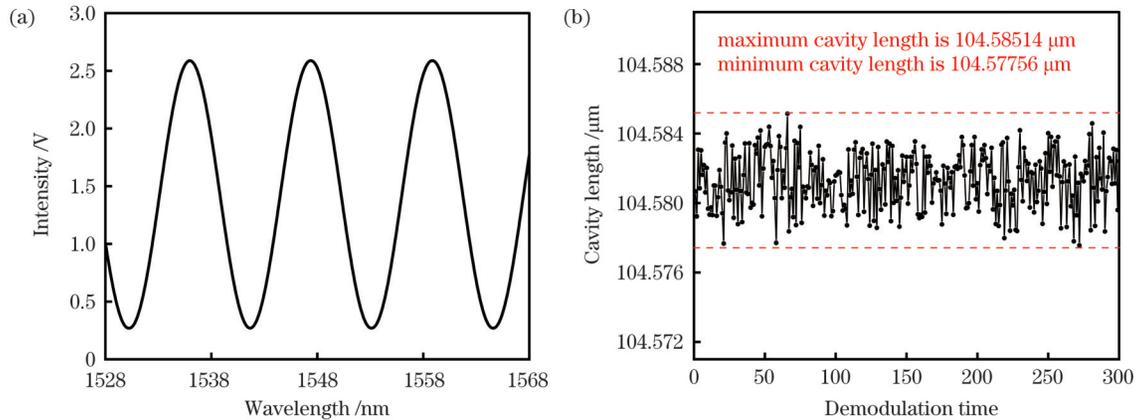


图 12 光纤 EFPI 解调结果。(a)干涉光谱;(b)腔长解调值

Fig. 12 EFPI demodulation results of optical fiber . (a) Interference spectrum; (b) demodulated cavity length

## 4 结 论

对 MG-Y 激光器的调谐特性展开研究,优化了波长调谐方法。利用波长测试框架高效地定位激光器的所有平滑调谐路径,并通过相位区电流实现波长精细调谐功能。同时依据内环电流反馈的思想,设计了一种自适应功率校准算法,减小激光器波长调谐时功率的漂移量。搭建了相应的测试系统并对激光器的调谐性能进行测试,结果表明:基于波长测试框架构建的 LUT 仅包含 3147 个反射器电流-波长组合,LUT 的构建效率得到提升,方法得到简化,LUT 中无效数据量大幅减少;激光器的波长调谐范围为 1528~1568 nm, SMSR 优于 40 dB,调谐步长为 5 pm,实际波长与设定波长的偏移量均小于  $\pm 2.9$  pm,标准差为 0.726 pm;波长连续调谐 30 次后,波长重复性优于 1.9 pm;经功率校准,波长调谐时的功率漂移量最大仅为 0.408 mW,稳定度为 3.57%;解调出光纤 EFPI 传感器的腔长变化量最大为 7.58 nm,可应用于 EFPI 光谱采集和腔长解调实验。优化后的波长调谐方法能够显著提升 MG-Y 激光器 LUT 的构建效率,同时可以减小激光器在波长调谐时的功率漂移量,具有实际应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Guo B, Xiao Q L, Wang S H, et al. 2D layered materials: synthesis, nonlinear optical properties, and device applications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(12): 1800327.
- [2] Dupuis R. An introduction to the development of the semiconductor laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1987, 23(6): 651-657.
- [3] 王启明. 中国半导体激光器的历次突破与发展(邀请论文)[J]. *中国激光*, 2010, 37(9): 2190-2197.  
Wang Q M. Breakthroughs and developments of semiconductor laser in China (invited paper)[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(9): 2190-2197.
- [4] 王德, 李学千. 半导体激光器的最新进展及其应用现状[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(3): 279-283.  
Wang D, Li X Q. New progress in semiconductor lasers and their applications[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(3): 279-283.
- [5] 陈良惠, 杨国文, 刘育衔. 半导体激光器研究进展[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 0500001.  
Chen L H, Yang G W, Liu Y X. Development of semiconductor lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 0500001.
- [6] Kovacevic M, Acampora A. Benefits of wavelength translation in all-optical clear-channel networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1996, 14(5): 868-880.
- [7] Yoo S J. Optical-packet switching and optical-label switching technologies for the next generation optical Internet[C]//OFC 2003 Optical Fiber Communications Conference, March 28-28, 2003, Atlanta, GA, USA. New York: IEEE Press, 2004: 797-798.
- [8] 杨舒涵, 乔顺达, 林殿阳, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度高灵敏度检测研究[J]. *中国光学*, 2023, 16(1): 151-157.  
Yang S H, Qiao S D, Lin D Y, et al. Study on high sensitivity detection of oxygen concentration based on tunable semiconductor laser absorption spectrum[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 151-157.
- [9] Xie Y L, Chang J, Chen X H, et al. A DFB-LD internal temperature fluctuation analysis in a TDLAS system for gas detection[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(3): 6801708.
- [10] 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.
- [11] 马超峰, 姜琦, 吴映, 等. 基于蓝光外腔半导体激光器的水下调频连续波激光测距[J]. *光子学报*, 2023, 52(6): 0614001.  
Ma C F, Jiang Q, Wu Y, et al. Underwater frequency modulated continuous wave laser ranging based on blue external cavity diode laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(6): 0614001.
- [12] 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.
- [13] 赵佳生, 夏诒民, 李乔力, 等. 低成本可调谐半导体激光器研究进展[J]. *光学学报*, 2022, 42(17): 1714003.  
Zhao J S, Xia Y M, Li Q L, et al. Research progress in low-cost

- tunable semiconductor lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(17): 1714003.
- [14] Heininger H. Longitudinal cavity mode referenced spline tuning for widely tunable MG-Y branch semiconductor laser[J]. *Radioengineering*, 2014, 23(1): 496-503.
- [15] 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.
- [16] 夏振杰, 刘强, 李昂, 等. 基于膜片式 EFPI 光纤麦克风的声源定位系统[J]. *中国激光*, 2021, 48(9): 0910002.  
Xia Z J, Liu Q, Li A, et al. Sound source localization system based on diaphragm-type EFPI optical fiber microphones[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(9): 0910002.
- [17] 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.
- [18] Weststrom 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 23-27, 2004, Los Angeles, CA, USA. Washington, D.C.: OSA, 2004: TuE2.
- [19] 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.
- [20] 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.  
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.
- [21] 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(3): 87-96.  
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(3): 87-96.
- [22] 刘强, 荆振国, 李昂, 等. 调制光栅 Y 分支激光器连续调谐特性[J]. *中国激光*, 2020, 47(12): 1206004.  
Liu Q, Jing Z G, Li A, et al. Quasi-continuous tuning characteristics of modulated grating Y-branch lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(12): 1206004.
- [23] 任帅, 庄炜, 董明利, 等. 调制光栅 Y 分支激光器波长连续调谐方法[J]. *光子学报*, 2022, 51(6): 0614001.  
Ren S, Zhuang W, Dong M L, et al. Quasi-continuous wavelength tuning method of modulated grating Y-branch laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(6): 0614001.
- [24] 何伟奇, 黄晓东, 赵建宜. 可调谐激光器波长测试系统的设计与实现[J]. *电子设计工程*, 2020, 28(16): 102-105, 110.  
He W Q, Huang X D, Zhao J Y. Design and implementation of automatic test system of tunable laser wavelength[J]. *Electronic Design Engineering*, 2020, 28(16): 102-105, 110.
- [25] 黄恽, 尤越, 邓传鲁, 等. 基于电流自适应补偿的高稳定度调制光栅 Y 分支型激光器控制系统[J]. *光子学报*, 2023, 52(2): 0214004.  
Huang Y, You Y, Deng C L, et al. High-stability MG-Y laser control system based on self-adaptive current compensation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52(2): 0214004.
- [26] Lewander M, Fried A, Weibring P, et al. Fast and sensitive time-multiplexed gas sensing of multiple lines using a miniature telecom diode laser between 1529 nm and 1565 nm[J]. *Applied Physics B*, 2011, 104(3): 715-723.
- [27] He X Y, Yu Y L, Huang D X, et al. Nonlinear effects in widely tunable ECSL with sampled fiber grating[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(3): 504-513.
- [28] Bustillos-Barcaya M C, Rinalde G F, Bulus-Rossini L A, et al. Y-branch tunable laser design: modeling, control and experimental validation[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 140: 107040.
- [29] 胡欢鹏, 梁磊, 吴崧, 等. 基于传输线激光器模型的调制光栅 Y 分支激光器仿真[J]. *光电子·激光*, 2022, 33(9): 911-919.  
Hu H P, Liang L, Wu S, et al. Simulation of modulated grating Y-branch laser based on transmission line laser model[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2022, 33(9): 911-919.
- [30] Yang R, Yu Y S, Chen C, et al. S-tapered fiber sensors for highly sensitive measurement of refractive index and axial strain[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(19): 3126-3132.

## Efficient Tuning Characteristics of Modulated Grating Y-Branch Lasers

Huang Yi\*, You Yue, Zhang Haosen, Deng Chuanlu, Hu Chengyong, Wang Lisen, Zhang Xiaobei, Wang Tingyun

*Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China*

### Abstract

**Objective** Because of their advantages of small size, light weight, and long lifespan, tunable semiconductor lasers have broad application prospects in the fields of coherent optical communication, fiber optical sensing, and gas sensing. In recent years, extensive research on laser-tuning methods has been conducted for various application scenarios. Modulated grating Y-branch (MG-Y) lasers have been widely studied owing to their wide tuning range, fast tuning speed, and high flexibility. To achieve the wavelength-tuning function of the MG-Y laser in practical applications, a wavelength-current look-up table (LUT) must be developed. A common method of constructing an LUT is to scan the reflector currents, which is inefficient. In this method, the LUT contains a large number of invalid wavelength data points. This is not conducive to regular calibration and makes it difficult to ensure wavelength accuracy. The wavelength-tuning characteristics of the MG-Y laser were investigated, and the tuning method was optimized to address the issues of low efficiency in constructing the wavelength-current LUT, the complexity of wavelength-tuning methods, and the large power drift during the wavelength tuning of the MG-Y laser.

**Methods** First, the current characteristics of an MG-Y laser are analyzed. According to the principle of the additive Vernier effect of the MG-Y laser, adjusting the reflector currents can control the position of the comb reflection spectrum and realize a wavelength-coarse tuning function. Second, a universal wavelength testing framework is designed by utilizing the tuning characteristics of the left

and right reflector currents and the principle of the orthogonal experiment. Third, a wavelength-tuning method based on a wavelength test framework is developed. All smooth wavelength-tuning paths can be obtained by scanning the reflector currents along the grid lines of the test framework. A wavelength-tuning range of 40 nm can be obtained by scanning the reflector currents along all smooth paths. A fine wavelength-tuning function is realized using the phase current of the MG-Y laser. Finally, a self-adaptive power calibration algorithm for wavelength tuning is developed. Using the principle of internal current loop feedback and based on the difference between the laser power feedback voltage and the threshold voltage, the laser output power calibration function is realized by self-adaptive adjustment of the current of the semiconductor optical amplifier.

**Results and Discussions** Only 3147 reflector wavelength combinations are included in the LUT built on the wavelength test framework, which greatly improves the efficiency of the LUT construction and reduces the number of invalid data points. A tuning performance test system and an optical fiber extrinsic Fabry-Perot interferometric (EFPI) cavity length demodulation system are used to evaluate the wavelength-tuning performance of the MG-Y laser. To verify the accuracy and effectiveness of the optimized wavelength-tuning method, the wavelength accuracy is tested first. The laser is tuned from 1528 nm to 1568 nm in step of 5 pm at room temperature for 8001 wavelength points. Good spectral quality is observed using the spectrometer, with no side-mode suppression ratio (SMSR) of less than 40 dB or wavelength jumps. The wavelength accuracy is better than  $\pm 2.9$  pm with a standard deviation of 0.726 pm, and the laser also exhibits good linearity in output wavelength when tuned to 5 pm. In addition, the repeatability of the wavelength is tested. To improve the testing efficiency, the tuning step of the laser is set to 5 nm, and the laser is continuously tuned 30 times from 1530 nm to 1565 nm. The results show that the maximum drift at the same wavelength is only 1.9 pm, while the minimum drift is 0.4 pm. The output power of the laser is measured using an optical power meter, and the laser power is set to approximately 11.46 mW. Before calibration, the power drift can reach as high as 2.382 mW in one C-band scan, with a stability of 20.69%; after calibration, the maximum power drift is only 0.408 mW, with a stability of 3.57%. Finally, the accuracy and effectiveness of the optimized wavelength-tuning method and the superiority of the MG-Y laser-tuning performance are verified through an optical fiber EFPI cavity length demodulation experiment. The maximum fluctuation of the EFPI cavity length error is 7.58 nm, with a standard deviation of 1.60 nm after scanning the C-band 30 times continuously. The results verify the accuracy and effectiveness of the optimized wavelength-tuning method and the excellent tuning performance of the MG-Y laser in practical applications.

**Conclusions** The wavelength-tuning characteristics of the MG-Y laser are investigated. Based on the tuning characteristics of the left and right reflector currents of the laser, a universal wavelength test framework is designed to locate all smooth tuning paths of the laser quickly and realize the fine-tuning function of the wavelength using the phase area currents. An adaptive power calibration algorithm is proposed to reduce the power drift of the laser during wavelength tuning. The results show that the LUT constructed based on the wavelength test framework contains only 3147 reflector current-wavelength combinations, the LUT construction method is simplified, and the number of invalid data in the table is considerably reduced. The wavelength-tuning range of the laser is 1528–1568 nm, the SMSR is greater than 40 dB, the offset between the actual wavelength and the set wavelength is less than  $\pm 2.9$  pm, and the standard deviation is 0.726 pm. The wavelength repeatability is better than 1.9 pm after continuous wavelength tuning is performed 30 times. The maximum power drift during wavelength tuning is only 0.408 mW after power calibration, and the stability is 3.57%. The maximum fluctuation of the EFPI cavity length error is 7.58 nm, which can be applied to optical fiber EFPI spectral acquisition and cavity length demodulation experiments. The results show that the optimized wavelength-tuning method significantly improves the construction efficiency of the LUT of the MG-Y laser while simultaneously improving the power stability of the laser during wavelength tuning, which has good practical application value.

**Key words** lasers; semiconductor lasers; wavelength tuning; power calibration; fiber optic sensing