

文章编号 1004-924X(2025)23-3649-09

高环境适应性可调谐激光源

尹炳琪¹, 盛立文^{1,2,3*}, 黄琳^{1,2,3*}, 周帅¹, 乔山¹, 张志辉¹

(1. 中电科思仪科技股份有限公司, 山东 青岛 266555;

2. 山东省电子测量仪器技术创新中心, 山东 青岛 266555;

3. 电子测试技术重点实验室, 山东 青岛 266555)

摘要:针对光频域反射测量技术对可调谐激光源的应用需求,设计了一种宽调谐范围、无跳模、高环境适应性的可调谐半导体激光源。根据反馈光与腔模式同步变化理论对转轴点进行计算和分析,实现了调谐过程中内腔和外腔振荡光的最佳模式匹配。对可调谐激光源在高温、低温、振动等不同条件下的输出波长稳定性和功率波动性等输出特性进行了实验研究。实验结果表明,在 0℃至 40℃的工作温度内和跌落、碰撞条件下,该可调谐激光源可具备长期稳定工作的能力。在驱动电流为 400 mA 的条件下,实现了从 1 499.999 8 nm 连续遍历至 1 649.999 6 nm 的无跳模可调谐输出以及全波段功率波动优于 0.033 1%、波长稳定性优于 0.33 pm/h、绝对波长精度优于 ± 0.85 pm 的可调谐激光输出,基本满足高精度光链路感知光频域反射测量仪的应用需求。

关键词:光纤光学;可调谐激光源;模式匹配;无跳模;调谐范围;光频域反射

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253323.3649

CSTR: 32169.14.OPE.20253323.3649

High environment adaptability tunable laser source

YIN Bingqi¹, SHENG Liwen^{1,2,3*}, HUANG Lin^{1,2,3*}, ZHOU Shuai¹, QIAO Shan¹, ZHANG Zhihui¹

(1. Ceyear Technologies Co., Ltd, Qingdao 266555, China;

2. Shandong Electronic Test & Measurement Technology Innovation Center, Qingdao 266555, China;

3. Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, Qingdao 266555, China)

* Corresponding author, E-mail: shengliwen@163.com; huanglin@ceyear.com

Abstract: To meet the application requirements of tunable laser sources for optical frequency-domain reflectometry (OFDR), a wide-tuning-range, mode-hopping-free semiconductor tunable laser source with high environmental adaptability is designed. Based on the theory of synchronous variation of feedback light and cavity modes, the pivot point is calculated and analyzed to achieve optimal mode matching between the oscillating light in the internal cavity and the external cavity during the tuning process. Subsequently, the output characteristics of the tunable laser source, including wavelength stability and power fluctuation under various conditions such as high and low temperatures and mechanical vibration, are experimentally investigated. The results demonstrate that the tunable laser source operates stably over long durations

收稿日期: 2025-06-12; **修订日期:** 2025-07-04.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2022YFF0705900, No. 2022YFF0707102); 国家自然科学基金资助项目 (No. U23B2046)

within an ambient temperature range of 0 °C to 40 °C and under conditions of drop and mechanical shock. At a driving current of 400 mA, continuous, mode-hopping-free tuning from 1 499.999 8 nm to 1 649.999 6 nm is achieved; the power fluctuation over the entire tuning range is better than 0.033 1%, the wavelength stability is better than 0.33 pm over 1 h, and the absolute wavelength accuracy is better than ± 0.85 pm. These performance metrics essentially meet the application requirements of high-precision optical link sensing OFDR systems.

Key words: fiber optics; tunable laser source; pattern matching; mode-hopping-free; tuning range; optical frequency domain reflection

1 引言

宽可调谐范围、高光谱纯净度的可调谐激光源(Tunable Laser Source, TLS)在光纤传感、环境监测以及相干通信等相关领域具有广泛的应用和巨大的市场需求^[1-6]。混合集成式可调谐激光源是基于自由空间外腔回馈光效应获得的窄线宽无跳模调谐输出装置,其调谐范围可达百纳米量级,动态线宽窄至百 kHz 甚至 kHz 级^[7-9]。近年来,用于高精度光传链路感知的光频域反射测量仪(Optical Frequency Domain Reflectometer, OFDR)已成为研究热点之一^[10-12]。为了提高 OFDR 的探测精度,其核心部件 TLS 不仅要满足对激光源动态线宽、无跳模、调谐范围等方面的输出特性要求,还要提高功率与波长稳定性、可靠性和环境适用性。若环境适应性差,由于内外腔腔长对环境响应不一致, TLS 难以在不同工况下均保证宽范围、无跳模的可调谐输出。因此,在满足一定调谐输出范围的前提下,实现 TLS 在宽温度范围内和振动条件下的稳定工作具有重要的工程意义。

2018 年,Guo 等^[13]报道了一种输出光束横向偏移仅有 0.033 mm 的改进型 Littrow 外腔反馈结构,该结构突破了传统 Littrow 结构输出光束方向不固定的限制,在 12.82 mm 谐振腔体长度的作用下,其连续无跳模的调谐范围可达 4.34 nm@805 nm。2021 年,Sheng 等^[14]基于 Littman-Metcalf 外腔反馈结构的具体构成,针对谐振腔体长度、闪耀光栅刻线密度、转轴点到步进电机运动轴线的间距、转轴点到闪耀光栅衍射点的间距以及闪耀光栅与入射光束夹角等参数对可调谐输出特性的影响开展了理论研究。相关结果表

明,闪耀光栅刻线密度和闪耀光栅与入射光束夹角是实现高质量可调谐激光输出设计过程中需要优先考虑的要因。2023 年,Qiao 等^[15]基于上述理论思想进行了具体的实验研究,在适当刻线密度闪耀光栅(900 lines/mm)的作用下,其无跳模输出范围可从 1 520 nm 连续或步进调谐至 1 620 nm,且边模抑制比 ≥ 65.64 dB。2024 年,Ge 等^[16]面向 50 G 无源光网络(Passive Optical Network, PON)架构中测试所用的 O 波段 TLS 开展了相关实验研究,采用自由空间外腔回馈光结构形式,在 500 mA 驱动电流驱动下,其连续无跳模可调谐输出范围可达 80 nm,扫描功率重复性为 ± 0.023 dB,相应的峰值输出光功率可达 17.98 dBm。

目前,国内外对 TLS 的研究工作^[17-19]主要集中于改进单频脉冲激光器^[20-24]的调谐范围、模式跳变抑制、窄线宽、转化效率等方面,而在环境适应性方面的研究却鲜有报道。部分实现宽温度范围工作的实验研究没有改变 TLS 整体所处的环境温度,只是调整了内腔源的工作温度,而用于 OFDR 的可调谐激光源必须要在宽温度范围内和振动环境下的稳定工作,如某型制导线包的缺陷检测场景,要求 TLS 的工作温度在低温 0 °C 和高温 40 °C 区间内具备高稳定性的无跳模输出能力,同时为保证检测精度要求,其调谐范围为 130 nm 以上。本文报道的激光源采用多级温控系统进行散热,整机可在 0~40 °C 环境温度内和振动条件下稳定输出,且调谐范围约为 150 nm,波长稳定性可达 ± 0.85 pm/h,功率波动优于 0.033 1%,满足 OFDR 的实际使用需求。

2 构成及其工作原理

2.1 基本构成

TLS 主要由光信号增益子系统、外腔反馈子系统、机械运动子系统、波长锁定子系统以及微处理单元等组成,如图 1 所示。光信号增益子系统由增益芯片、热电制冷器、金属管壳和光纤准直器等构成。外腔反馈子系统由模压非球面透镜(焦距为 4.51 mm,数值孔径为 0.55)、闪耀光栅(刻线密度 900 grooves/mm,衍射效率 $\geq 80\%$ @P 偏振态)与调谐镜等组成。机械运动子系统由低热膨胀系数支撑座、转臂和运动系统(直流电机、编码器、运动控制卡、压电陶瓷)等构成。波长锁定子系统由偏振分束器、光电探测器、法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)标准具和侧向位移棱镜等组成。

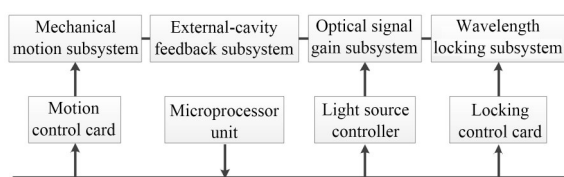


图 1 可调谐激光源的基本组成框图

Fig. 1 Basic block diagram of tunable laser source

2.2 工作原理

TLS 的结构示意图如图 2 所示。值得注意的是,光信号增益子系统、外腔反馈子系统和机械运动子系统配合相应的控制单元或者板卡即可构成图中所示的谐振腔体模块。同理,波长锁定子系统结合相应的电路运算控制则构成了波长锁定模块。其中,B1(Block1)代表谐振腔体模块的 0 级谐振输出光,B2(Block2)代表波长锁定模块对 0 级空间光束的收集,两者通过商用光纤跳线相连。

为实现高光谱纯净度谐振激光信号输出,光信号增益子系统为外腔反馈子系统提供初始宽谱辐射种子光信号。然后,外腔反馈子系统内的模压非球面透镜对其整形,整形后的平行光束以满足光栅衍射方程的角度入射至闪耀光栅表面发生衍射分光,经色散分光后可垂直入射至调谐镜表面的 +1 级衍射光会按原路回馈至闪耀光栅

表面。此时,只有满足特定条件的衍射光信号可以返回至光信号增益子系统的有源区,回到有源区的反馈光因为模式竞争获得较强的信号增益从而实现单纵模式输出。通过改变机械运动子系统中直流电机的位置实现 +1 级衍射光频率的调谐,即实现可调谐激光光束输出。波长锁定子系统通过错峰排列不同自由光谱范围的 F-P 标准具,实现光信号增益子系统实时波长误差信号的反馈和波长扫描范围内任意波长点的高精度锁定^[25],以提高 TLS 的绝对波长精度和波长稳定性。机械运动子系统用来调整外腔反馈子系统反馈光波长,可以在软件的控制下进行步进或连续的可调谐输出。

事实上,为了提高 TLS 的环境适应性(稳定性),需要降低谐振腔体中腔体长度随外界变化的敏感度。鉴于此,利用特殊配比的低热膨胀系数金属基材作为腔体刚性支撑体,同时以增益芯片内部集成的 TEC 控温能力作为参考,采用多级温控结构与 PID 算法实现腔体内宽变温条件下温度场的快速平衡,并优化转臂结构使其共振频率偏移,辅助增加高弹性模量的减振单元。通过波长锁定模块的实时反馈信息快速调整机械运动子系统的压电陶瓷,实现内外腔体长度的匹配调整,从而实现高的环境适应性。

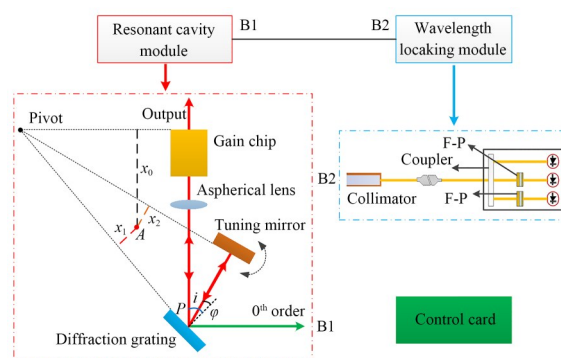


图 2 可调谐激光源结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of tunable laser source

通过利用光信号增益子系统空间输出端的 0 级衍射光信号,既可满足波长锁定子系统对输入光强度的要求,又可以提升 TLS 的整机输出光功率。值得注意的是,整形透镜的装配位置会对 TLS 的可调谐范围以及模式稳定性产生较大影

响。借鉴本团队前期的理论分析和实验摸索^[26],当整形透镜优化后的光腰位置对应的长度(以增益芯片发光面作为参考零点)与外腔长度相匹配时,可有效改善 TLS 的输出特性。而在旋转调谐元件时,相位的变化是由于腔内模结构相对于反馈频率以腔模式间距为单位的跳变导致的。为了实现宽范围无跳模连续可调谐输出,相位的变化应小于 2π ,假设所设计激光源谐振腔中调谐镜的旋转轴为 A,光波在谐振腔内传播一周后的相位变化为:

$$G_m(P) \exp\{[x_0 + x_2 + x_1(\cos i + \cos \phi)]\}. \quad (1)$$

累计往返的相位可表示为^[14]:

$$\psi = 2k[x_0 + x_2 + x_1(\cos i + \cos \phi)], \quad (2)$$

其中: $G_m(P)$ 代表光栅的 m 阶衍射效率,等于 P 点处入射光与衍射光波前相位的变化, i 为入射光角度, ϕ 为衍射光角度, x_0, x_1, x_2 分别为旋转轴到增益芯片后端面、闪耀光栅前表面和调谐镜前表面的垂直距离。只有当反射镜的旋转轴 A 处的积累相位等于常数时,即与衍射角度及反馈波长无关,则可实现反馈光与腔模式的同步变化。因此,旋转轴 A 应满足^[27]:

$$x_1 = 0, x_0 + x_2 = 0. \quad (3)$$

即调谐镜、闪耀光栅和增益芯片后端面三者延长线的交点为最佳转轴点。因此,整个实验系统在设计过程中,在设计(外腔长度约为 50 mm)、加工(典型误差值优于 ± 0.005 mm)和装配误差范围内,使增益芯片(直波导)、调谐镜和闪耀光栅三者表面的延长线交于一点(转轴点),可保证在全调谐范围内内外腔模式的同步扫描。

3 实验结果及分析

3.1 室温下激光输出性能

首先,利用高精度波长计(横河, AQ6150B)测试了 TLS 在室温(23°C , 45.3% RH)条件下的调谐范围、功率和波长稳定特性。驱动电流为 400 mA,热电制冷器控温 25°C ,调谐步进间隔为 10 nm,扫描速度为 20 nm/s,可调谐输出范围的测试结果以及 TLS 起始与终止输出波长谱图如图 3 所示,调谐范围可达 149.999 8 nm,绝对波长精度为 ± 0.85 pm。

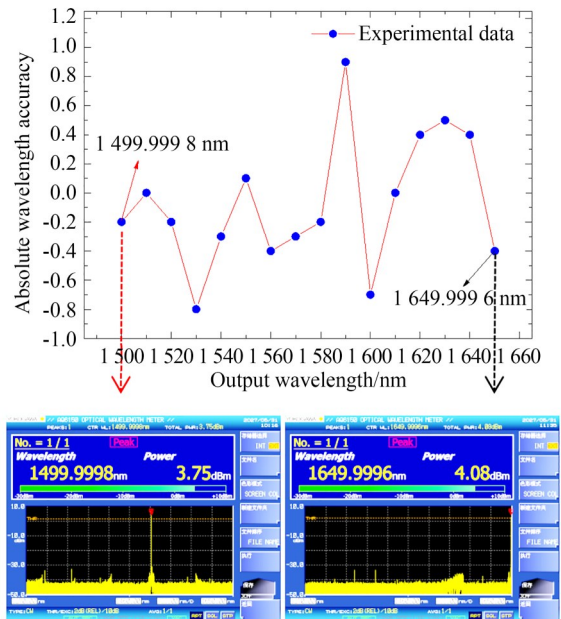


图 3 可调谐范围和绝对波长精度测量结果

Fig. 3 Measuring result of tuning range and absolute wavelength accuracy

不同波长下激光输出功率和波长稳定性的变化曲线如图 4 所示。每个波长点下对 TLS 的输出功率进行 3 600 s 的连续监测,结果显示输出功率与波长均可以保持很好的稳定性,功率波动优于 0.032 8% (标准差/平均值),波长稳定性优于 0.30 pm/h,波长稳定性测试结果的纵轴为测量波长的标准差。其中, TLS 在谐振输出波长为 1 500 nm 时,连续 3 600 s 的输出波长稳定性结果如图 4(a) 和 4(c) 所示,经计算可得,输出波长的平均值为 1 499.999 7 nm,标准差为 0.30 pm。通过输出波长的抖动范围 (1 499.999 2~1 550.000 3 nm) 可以推断出所述激光源一直工作在无跳模状态,因为最大波长偏差仅为 0.8 pm,远远小于 50 mm 外腔长度对应的模式间隔 (24 pm@1 550 nm)。功率波动性测试结果如图 4(b) 所示,可得,输出功率平均值为 7.181 mW@1 500 nm,对应的标准差为 0.002 36 mW。

最后,利用强相干包络的自相干检测方法对 TLS 的光谱线宽开展了实验研究^[28],线宽随谐振波长的变化曲线如图 5 所示。得益于驱动板电流噪声抑制和 50 mm 长腔长设计与加工能力,从结

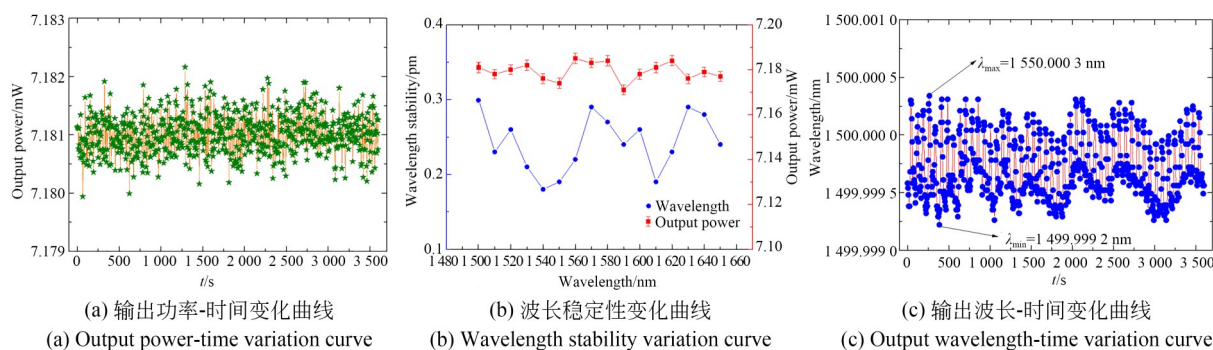


图 4 不同波长下激光输出功率和波长稳定性的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of TLS output power and wavelength stability at different wavelengths

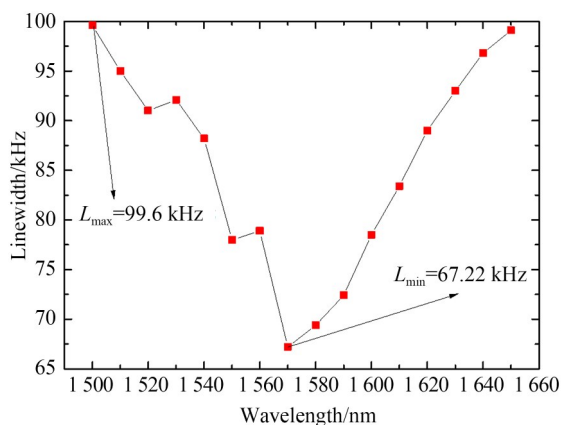


图 5 输出光谱线宽随谐振输出波长的变化关系

Fig. 5 Change relationship between output spectral linewidth and resonant output wavelength

果可知,整个可调谐输出范围内的光谱线宽均优于 99.60 kHz,而最小输出线宽可达 67.22 kHz@1 570 nm。这一方面与由于设计装配的中心位置有关;另一方面与增益芯片的增益中心波长相关,偏离增益峰值以后,增益降低,腔体损耗增加,从而引起线宽的增加。

3.2 高低温下激光输出特性

依据 GJB 3947A-2009 中四级设备温度环境要求,首先,将 TLS 置于高低温湿热试验箱中(控温精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$),测试其分别在低温(-40°C)和高温(70°C)条件下的输出光功率和波长稳定性。低温和高温温度点下 TLS 各贮存 4 h,即非工作条件下,贮存时驱动电流和 TEC 温控均处于关闭状态。输出特性表征时,驱动电流等参数设置与室温下测试条件相同。图 6 为 TLS 输出功率和波长稳定性随调谐波长变化的关系曲线。曲

线整体较为平稳,功率波动优于 0.032 7%,波长稳定性优于 0.31 pm/h,与常温测试结果相吻合。

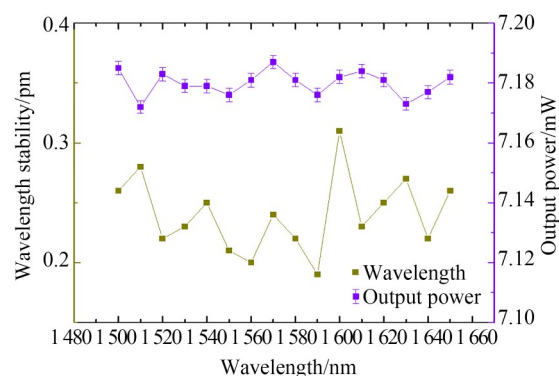


图 6 不同波长下输出功率和波长稳定性的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of output power and wavelength stability at different wavelengths

然后,对其分别在 0, 23 和 40°C 宽温度条件下的输出稳定性开展了实验研究,测试结果分别如图 7 和图 8 所示。由图 7 可知,当环境温度为 0°C 时,全波段范围内输出波长稳定性优于 0.30 pm/h; 23°C 时,全波段范围内输出波长波动优于 0.28 pm/h; 40°C 时,全波段范围内输出波长波动优于 0.33 pm/h,曲线平稳,接近室温下的测试结果。这主要得益于波长锁定模块的快速锁定和反馈能力,使宽变温条件下的输出波长抖动被有效补偿。由图 8 可知,温度为 23°C 时 TLS 的输出功率最高,功率最低的测试结果出现在设置输出波长 1 620.000 0 nm 处,其平均输出功率为 7.174 mW,标准差为

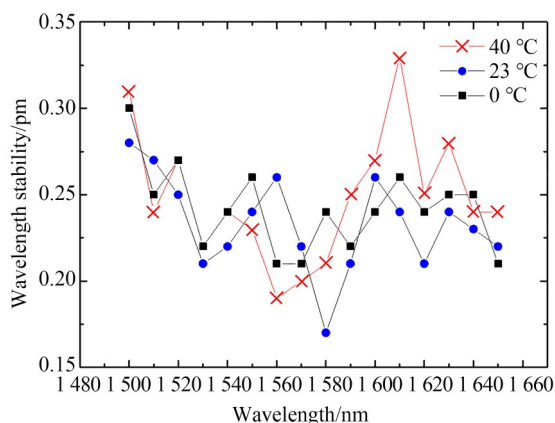


图 7 不同温度下波长稳定性随输出波长的变化关系

Fig. 7 Relationship between wavelength stability and variation of output wavelength at different temperatures

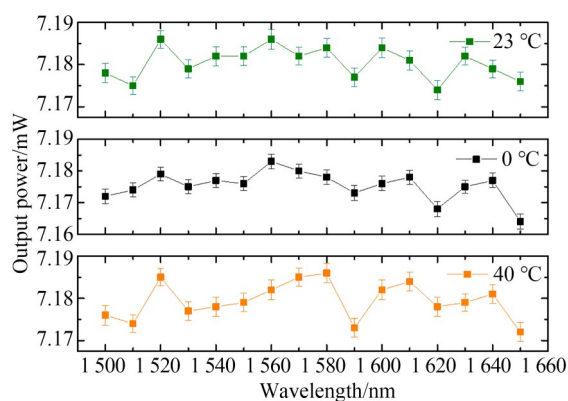


图 8 不同温度下输出功率稳定性随输出波长的变化关系

Fig. 8 Relationship between out power stability and output wavelength at different temperatures

2.28 μW , 波动仅为 0.0318%, 全波段范围内的最大波动为 0.0319% @ 1500 nm; 0 $^{\circ}\text{C}$ 时, 最低平均输出功率为 7.172 mW, 标准差为 2.25 μW , 波动为 0.0313%, 全波段范围内的最大波动为 0.0324% @ 1500 nm; 40 $^{\circ}\text{C}$ 时, TLS 的输出功率最低, 对应的谐振波长为 1650.000 0 nm 左右, 平均输出功率为 7.164 mW, 标准差为 2.37 μW , 波动为 0.0331%。这种情况的原因有以下几种可能: (1) 有源区输出功率在高温下降低导致腔损增加, 但由于 TEC 控温的存在, 其影响非常小; (2) 热沉和支撑件间的热膨胀系数差导致不同温度下的形变量不同, 所以模式匹配会偏移, 影响 TLS 的输出功率。虽然, 高温条件下, TLS 的输出功率比其他温度条件下的测试结果略

低, 但其依然可以较为稳定的工作, 而且波长稳定性和功率稳定性良好。相比于国外标杆产品 (TLS-570), 其工作环境温度为 15~35 $^{\circ}\text{C}$, 波长稳定性为 ± 1 pm。显然, 在相同的测试条件下, 本文所述激光源的工作温度上限可提升 5 $^{\circ}\text{C}$, 工作温度下限可提升 15 $^{\circ}\text{C}$, 波长稳定性提升了将近 30%。

3.3 跌落和碰撞测试

在振动试验台上对 TLS 进行了跌落和碰撞测试。碰撞测试采用单点控制方式进行, 在 100 m/s^2 脉冲峰值加速度, 半正弦波脉冲波形, 16 ms 持续时间的条件下开展, 每分钟 60 次, 共 1000 次。跌落测试采用自由跌落方式, 跌落高度设置为 250 mm。测试结束后, 每个波长点下进行连续 1 h 的功率和波长稳定性测量, 测试结果如图 9 所示, 功率波动和波长稳定性分别为 0.033 1%, 0.31 pm/h, 与常温下的测试结果基本吻合。测试结果显示, TLS 满足基本的抗振动设计能力, 以及 OFDR 对可调谐激光源的环境使用要求。

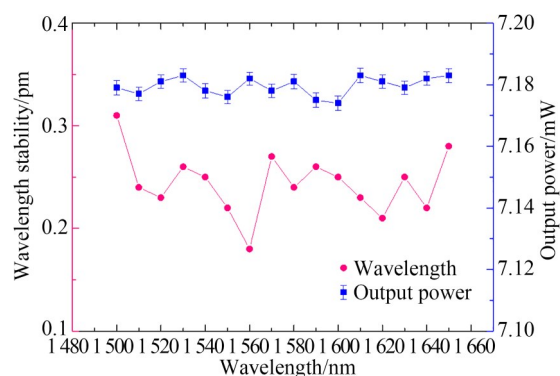


图 9 振动下 TLS 的稳定性测量结果

Fig. 9 Measuring result of stability of TLS under vibration

4 结 论

本文设计了一台宽范围、无跳模、高环境适应性的可调谐激光源, 在驱动电流 400 mA、风冷散热条件下, 实现了可调谐范围约为 150 nm (1499.999 8~1649.999 6 nm)、功率波动优于 0.033 1%、波长稳定性优于 0.33 pm/h、绝对波长精度为 ± 0.85 pm 以及线宽均优于 99.60 kHz

的可调谐激光输出。对 TLS 在高低温和振动条件下的输出特性开展了实验研究。实验结果表明,激光器在测试点高温 40 °C 和低温 0 °C 下,输出功率略有波动,但仍然可以保持很好的稳定性,并且波长稳定性与室温条件下测试结果基本相符。在跌落和碰撞条件下,TLS 运转可靠,满足 OFDR 特殊的工作环境需求。本研究为 OFDR 健康监测提供了稳定可靠的激光源,但其输出光谱线宽与国外标杆产品(≤ 50 kHz)还存在明显差距,后续将针对线宽压缩方面展

开研究工作,以进一步满足实际工程应用需求。

作者贡献声明:

尹炳琪:实验设计和论文撰写;
盛立文:测量方法提出和论文构思;
黄琳:获取资助;
周帅:数据整理和分析;
乔山:实验数据分析;
张志辉:论文审核与编辑写作。

参考文献:

- [1] 刘崎,王震宇,陈瑾. TDLAS 在大气检测领域的研究进展[J]. 光电技术应用, 2021, 36(6): 24-27, 70.
LIU Q, WANG ZH Y, CHEN J. Research progress of TDLAS in atmospheric detection[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2021, 36(6): 24-27, 70. (in Chinese)
- [2] 李鹏,盛立文,黄琳,等. 窄线宽可调谐半导体激光器研究进展(特邀)[J]. 光电技术应用, 2023, 38(2): 1-9, 84.
LI P, SHENG L W, HUANG L, *et al.* Research progress of narrow linewidth tunable semiconductor lasers (invited) [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2023, 38(2): 1-9, 84. (in Chinese)
- [3] SHENG L W, WANG J J, HUANG L, *et al.* Advances in narrow linewidth and wide tuning range external-cavity wavelength-swept lasers[J]. *Frontiers in Physics*, 2024, 12: 1380905.
- [4] XU P B, YU X F, CHEN Z J, *et al.* Distributed refractive index sensing based on bending-induced multimodal interference and Rayleigh backscattering spectrum [J]. *Optics Express*, 2021, 29(14): 21530-21538.
- [5] MA Y R, YANG Q, TANG Y, *et al.* 1-Tb/s single-channel coherent optical OFDM transmission with orthogonal-band multiplexing and subwavelength bandwidth access[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(4): 308-315.
- [6] 郎金鹏,葛崇琳,韩纪磊,等. 基于外腔反馈的可调谐半导体激光光源的扫频特性研究[J]. 河北工业大学学报, 2024, 53(5): 34-38.
- LANG J P, GE CH L, HAN J L, *et al.* Study on the sweeping characteristics of tunable semiconductor laser sources with external cavity feedback [J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2024, 53(5): 34-38. (in Chinese)
- [7] LIU D, JIANG Y. A single-longitudinal-mode S + C band wavelength-tunable fiber laser[J]. *Sensors*, 2024, 24(8): 2576.
- [8] SUN J SH, QIU L Q, LIU L, *et al.* Output characteristics of external-cavity mode-hop-free tunable laser source in C+L band[J]. *Photonics*, 2024, 11(7): 677.
- [9] WANG Y, DING K K, WU H, *et al.* Tunable narrow linewidth external cavity diode laser employing wide interference filter and diffraction grating [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(19): 10790.
- [10] CHEN L, HE P T, JIANG B Q, *et al.* Suppression of modulation-induced polarization error in spliceless open-loop fiber optic gyroscope[J]. *Chinese Optics Letters*, 2024, 22(7): 070601.
- [11] 谭景甲,韩强,董杰,等. 基于 OFDR 的光纤链路检测的实现[J]. 光电技术应用, 2025, 40(1): 7-11, 46.
TAN J J, HAN Q, DONG J, *et al.* Implementation of optical fiber link detection based on OFDR [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2025, 40(1): 7-11, 46. (in Chinese)
- [12] LV Y J, XIAO X P, LI H, *et al.* Strain measurement with adaptive local feature extraction method based on special fiber OFDR system [J]. *Optics Express*, 2024, 32(4): 5043-5055.
- [13] GUO H P, OLAMAX G T. Analysis of no mode-hop tuning of mirror-grating external-cavity diode

- laser [J]. *Optics Communications*, 2018, 421: 90-93.
- [14] 盛立文, 张爱国, 乔山, 等. 外腔调谐源的无跳模纵向允许误差研究(特邀)[J]. 光电技术应用, 2021, 36(5): 66-72.
- SHENG L W, ZHANG A G, QIAO SH, *et al.* Study of longitudinal allowance error for mode-hopping free external cavity tunable semiconductor lasers(invited)[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2021, 36(5): 66-72. (in Chinese)
- [15] QIAO SH, SHENG L W, HUANG L, *et al.* High-SMSR wavelength-swept laser with a CL-band mode-hopping free tuning range[J]. *Frontiers in Physics*, 2023, 11: 1155266.
- [16] 葛崇琳, 郑策, 盛立文, 等. 面向 50G PON 架构中测试用的扫频光源研究[J]. 光电技术应用, 2024, 39(6): 21-24, 62.
- GE CH L, ZHENG C, SHENG L W, *et al.* Research on sweep frequency laser source for testing in 50G PON architecture[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2024, 39(6): 21-24, 62. (in Chinese)
- [17] ZHU J Y, QIAO D, UNIVERSITY F, *et al.* 1.7 THz tuning range pivot-point-independent mode-hop-free external cavity diode laser[J]. *Optics Express*, 2023, 31(3): 3970.
- [18] WANG Y, WU H, CHEN C, *et al.* An ultra-high-SMSR external-cavity diode laser with a wide tunable range around 1550 nm[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(20): 4390.
- [19] 盛立文, 葛崇琳, 曹乾涛, 等. 宽范围无跳模外腔可调谐半导体激光器[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(8): 20230374.
- SHENG L W, GE CH L, CAO Q T, *et al.* Wide-range external-cavity tunable semiconductor laser with mode-hopping free[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(8): 20230374. (in Chinese)
- [20] 段丹阳, 董云升, 张天舒, 等. 高环境适应性全固态激光器[J]. 量子电子学报, 2023, 40(6): 858-867.
- DUAN D Y, DONG Y SH, ZHANG T SH, *et al.* High environmental adaptability all-solid-state laser[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2023, 40(6): 858-867. (in Chinese)
- [21] 白家荣, 刘源, 钟朝阳, 等. 可低温工作的窄脉冲宽温激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0101004.
- BAI J R, LIU Y, ZHONG CH Y, *et al.* Narrow pulse width lasers operating over wide range of low temperature[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0101004. (in Chinese)
- [22] 朱永斌, 马圣洁, 程庭清, 等. 2.79 μm 高速转镜调 Q Er, Cr: YSGG 纳秒窄脉冲激光器[J]. 光学精密工程, 2024, 32(8): 1122-1129.
- ZHU Y B, MA SH J, CHENG T Q, *et al.* High-speed rotating-mirror Q-switched Er, Cr: YSGG nanosecond narrow pulse laser at 2.79 μm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(8): 1122-1129. (in Chinese)
- [23] 吴春婷, 常奥磊, 温雅, 等. 单掺 Nd³⁺ 双波长全固态激光器研究进展[J]. 发光学报, 2020, 41(4): 414-428.
- WU CH T, CHANG A L, WEN Y, *et al.* Research progress of Nd³⁺-doped dual-wavelength all-solid-state laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(4): 414-428. (in Chinese)
- [24] 王君立, 尹福昌, 宋正勤, 等. 高稳定输出功率的全固态激光器[J]. 发光学报, 2011, 32(8): 830-833.
- WANG J L, YIN F CH, SONG ZH X, *et al.* An all-solid-state laser with high stability output power [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2011, 32(8): 830-833. (in Chinese)
- [25] LI Y, CHEN B, HU SH, *et al.* Instant laser wavelength measurement based on dual fabry-Pérot etalons [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(23): 2039-2042.
- [26] 韦育, 张爱国, 乔山, 等. 外腔可调谐半导体激光器的输出特性(特邀)[J]. 光电技术应用, 2023, 38(5): 1-5.
- WEI Y, ZHANG A G, QIAO SH, *et al.* Output characteristics of external cavity tunable semiconductor lasers(invited)[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2023, 38(5): 1-5. (in Chinese)
- [27] 王延. Littrow 结构近红外外腔半导体激光器的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2020.
- WANG Y. *Study on the Near-Infrared External Cavity Semiconductor Laser of Littrow Configura-*

tion[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)

[28] BAI Z X, ZHAO Z A, QI Y Y, *et al.* Narrow-linewidth laser linewidth measurement technology [J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 9: 768165.

作者简介:



尹炳琪(1987—),男,山东潍坊人,硕士,工程师,2010年、2013年于吉林大学分别获得学士和硕士学位,主要从事可调谐激光装置、光纤功率测试装置等方面的研究。E-mail: yinbingqi@ceyear.com

通讯作者:



黄琳(1989—),男,山东临沂人,博士,高级工程师,2018年于北京交通大学获得博士学位,主要从事可调谐激光装置的国产化研究。E-mail: huanlin@ceyear.com

通讯作者:



盛立文(1988—),男,黑龙江肇东人,博士,高级工程师,2013年于哈尔滨理工大学获得硕士学位,2019年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事可调谐激光装置的国产化研究。E-mail: shengliwen@ceyear.com