

文章编号: 1002-1582(2025)04-0479-06

国产化 Littrow 型外腔式可调谐半导体激光器

李孟倩, 江毅*

(北京理工大学 光电学院 信息光子技术工业和信息化部重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 设计并构建了一款基于 Littrow 结构的国产化外腔式可调谐半导体激光器, 旨在推动高性能激光器的国产化进程并满足精密光谱学、光纤传感等领域对高质量光源的需求。激光器的所有光器件均为国产, 基于各组件的参数特点设计了一种紧凑型机械结构。完成搭建后, 对激光器进行调试与性能优化, 提高了光束质量。Littrow 型外腔式可调谐半导体激光器为单纵模运转, 中心波长为 1580nm, 波长最大调谐范围为 74.06nm, 调谐速度可达 261.256nm/s, 相干长度大于 37.5m, 线宽小于 8MHz (0.064pm)。

关 键 词: 激光器; 外腔式; 可调谐; 国产化; Littrow 结构

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

A domestic tunable external cavity diode laser with Littrow configuration

LI Mengqian, JIANG Yi*

(Key Laboratory of Photonic Information Technology, Ministry of Industry and Information Technology, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A domestic tunable external cavity diode laser based on Littrow configuration is designed and constructed, aiming to advance the localization of high-performance lasers and meet the demand for high-quality light sources in fields such as precision spectroscopy and fiber optic sensing. All optical components of this laser are made in China. A compact mechanical structure is designed based on the parameter characteristics of each component. After the completion of the construction, the laser was debugged and optimized to improve the beam quality. The Littrow tunable external cavity diode laser operates in a single longitudinal mode, with a central wavelength of 1580 nm, a maximum wavelength tuning range of 74.06 nm, a tuning speed of 261.256 nm/s, a coherence length of more than 37.5 m and a linewidth of less than 8MHz (0.064 pm).

Keywords: laser; external cavity; tunable; domestic; littrow configuration

0 引 言

半导体激光器, 即激光二极管 (Laser Diode, LD) 具有体积小、结构简单、波长范围广、可直接调制、转换效率高、价格便宜等诸多优势, 在光纤通信^[1]、工业制造^[2]和激光切割^[3]等诸多领域得到了广泛的应用。随着科技的不断进步, 对于半

导体激光器的性能要求也在逐步提升, 不仅需要其具备窄线宽的特性, 而且要求激光波长在较大的范围内连续可调。

在高精度光谱^[4]、激光雷达^[5]、激光传感^[6-7]、量子光学研究^[8]和相干光通信^[9]等领域, 能够实现波长连续调谐且具备单纵模、窄线宽特性的半导体激光器是不可或缺的光源。采用衍射光栅作为

收稿日期: 2025-02-21; 收到修改稿日期: 2025-04-23

基金项目: 国家科技重大专项 (J2022-V-0004-0030); 国家自然科学基金 (U20B2057)。

作者简介: 李孟倩 (2000—), 女, 硕士研究生, 从事外腔式半导体激光器研究。limengqian321@126.com

江毅 (1967—), 男, 教授, 博士, 从事光纤传感技术研究。

* 通讯作者: bitjy@bit.edu.cn

外部反馈元件的外腔式可调谐半导体激光器 (Tunable External Cavity Diode Laser, ECDL) 因具有宽波长调谐范围、窄线宽、结构紧凑、技术成熟等优点而备受瞩目, 其主要采用两种结构: Littrow 型和 Littman-Metcalf 型。其中 Littrow 型激光器作为应用最广泛、最典型的外腔式可调谐激光器之一, 除了具有输出激光的调谐范围宽和无跳模现象之外, 还具有输出功率高、光路系统简单、成本低廉等优势, 引发国内外众多科研人员的高度关注。

当前, 国外已有多家公司开发出了成熟的 Littrow 型外腔式可调谐半导体激光器, 例如 Sacher Lasertechnik Group 公司的 Littrow 型可调谐激光器产品性能优越, 其中 Lynx S3 型号激光器以 1550nm 为中心波长, 波长可调谐范围为 1480~1580nm, 输出功率高达 50mW, 拥有小于 100kHz@1ms 的窄线宽, 无跳模调谐范围达 30GHz 以上^[10]。Thorlabs 作为一家知名的光电子仪器制造商, 曾出售一款型号为 TLK-L1550R 的 Littrow 型激光器产品, 其具有 10kHz 的窄线宽, 波长调谐范围为 38nm, 输出功率为 13dBm, 可选 C 波段和 L 波段两个波段, 目前已停产。TOPTICA 公司也有多款 Littrow 型激光器, 其中 DL Pro 系列产品波长调谐范围可达 100nm, 输出功率高达 220mw, 无跳模调谐范围为 20GHz, 瞬时线宽小于 500kHz^[11]。然而, 该类产品目前普遍存在采购困难、价格高昂等问题, 严重限制了其在国内相关领域的广泛应用。因此, 国内急需产出性能稳定、波长调谐范围宽、线宽窄的国产化外腔式可调谐半导体激光光源产品。本文设计并搭建了一款中心波长 1580nm 波段的 Littrow 型外腔式可调谐半导体激光器, 其中所有光器件均为国产, 该外腔式半导体激光器的波长最大调谐范围为 74.06nm, 功率 3dB 调谐范围为 59.10nm, 调谐速度可达 261.256nm/s, 相干长度大于 37.5m, 线宽小于 8MHz (0.064pm)。

1 实验原理

图 1 是以衍射光栅作为外部反馈元件的 Littrow 型外腔式可调谐半导体激光器的结构示意图。增益芯片的输出光经透镜进行准直处理, 形成水平方向的平行光照射到衍射光栅上产生衍射现象。其中一级衍射光反馈回激光器的有源区域, 与增益芯片的内部光场发生相互作用, 筛选出特定波长的单模激光, 实现激光输出, 其输出方向通常是零级衍射光

方向或是芯片后端面的方向。在模式竞争过程中, 满足激光激发条件的纵模被激发, 增益较小的模式则被抑制, 激光器得以实现单模输出。

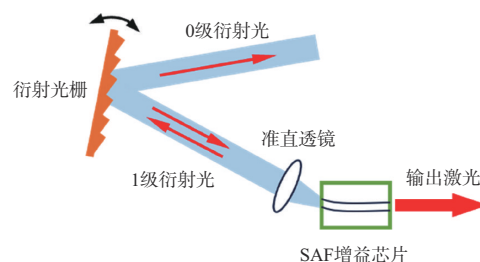


图1 Littrow 型 ECDL 结构示意图

衍射光栅根据其衍射方向的差异, 可以分为透射式和反射式两种类型。反射式光栅的光栅方程为

$$m\lambda = d(\sin \theta_i \pm \sin \theta_m) \quad (1)$$

式中, m 为衍射级次, 即主极大级次; λ 为输出波长; d 为光栅常数; θ_i 为入射光与光栅面法线之间的夹角; θ_m 为第 m 级衍射光与光栅表面法线之间的夹角。当入射光和衍射光位于光栅表面法线的同一侧时, 光栅方程取正值; 反之, 当入射光和衍射光位于光栅表面法线的两侧时, 光栅方程取负值。

对于 Littrow 型外腔式半导体激光器而言, 入射光以一级衍射角入射到光栅并发生衍射, 其激光波长同时满足激光器的相位条件公式和光栅方程

$$\lambda = \frac{2L}{q} \quad (2)$$

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (3)$$

式中, q 为模式数。Littrow 型外腔式激光器通过旋转衍射光栅的方式, 实现对光栅一级衍射角和外腔腔长的同步改变, 从而进行模式选择获得不同波长的激光输出, 达成波长调谐的目的。

2 激光器系统设计

图 2 为根据以上实验原理设计的激光器机械结构的三维设计装配图, 图 3 为搭建好的激光器实物图。该激光器的机械结构部分主要由底板、增益芯片底座、透镜支架、光栅支架以及微调部件等构成。机械加工件采用铝合金材料加工, 底座尺寸为 30cm×30cm。

该款外腔式激光器采用的增益芯片为中国科学院半导体研究所提供的单角面 (single angle facet, SAF) 增益芯片, 为外腔式激光器提供了足够宽的增益调谐范围, 激光器的驱动电流需要

大于 SAF 增益芯片的阈值电流。增益芯片出射的光是高度发散的, 需要对其进行准直和聚集, 本文使用 LBTEK 研制生产的模压非球面透镜, 其优势在于准直光时不会在透射波前中引入球差。采用的大恒光电生产的平面反射闪耀光栅是衍射光栅中的一种, 其特点是最大衍射光强能级闪耀落在零级光谱以外区域, 其工作波长为 1500nm, 闪耀角为 26.74°, 闪耀波长下的一级光栅衍射效率可达 60~80%, 符合 Littrow 型外腔式激光器对外部光反馈元件的性能需求。激光器系统中闪耀光栅的转动靠电机推动实现, 该款电机具有 10mm 的行程, 空载速度可达 18mm/s, 满载速度为 8mm/s, 能够满足激光器对调谐速度的需求。

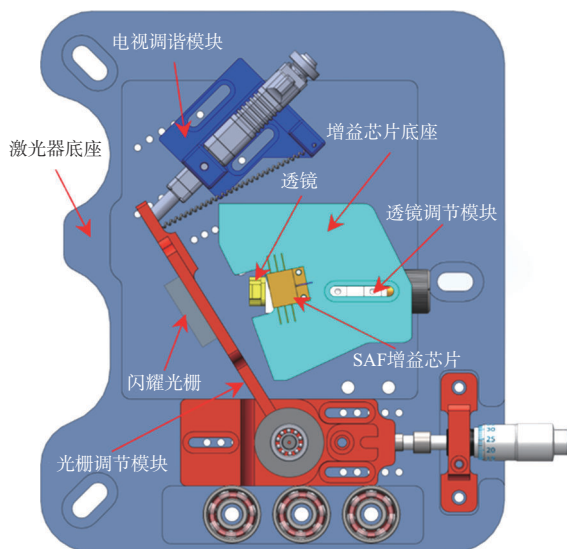


图2 激光器机械结构三维设计装配图

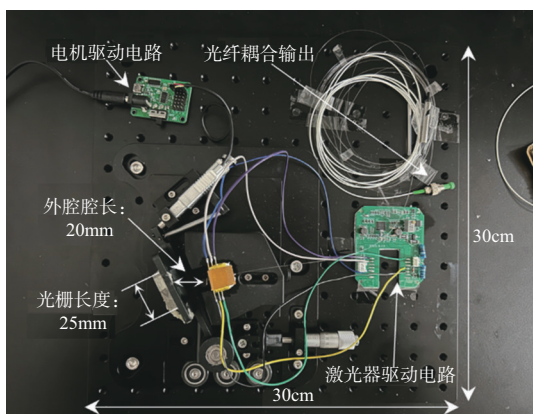


图3 实验装置图

3 激光器性能测试

完成 Littrow 型外腔式可调谐半导体激光器的装配与调试后, 对其工作性能进行检测, 包括波长调谐特性、线宽特性、功率稳定性与波长稳定性等。

3.1 波长调谐特性

根据式 (3), 激光输出波长由光栅方程决定, 激光器的中心波长为 1550nm, 光栅常数为 1/600mm, 代入可得初始衍射角为 27.71°。对式 (3) 求微分, 得到激光输出波长随光栅衍射角的变化率

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta\theta} = 2d \cos \theta \quad (4)$$

将光栅常数和初始衍射角代入式 (4), 得到输出波长随衍射角的变化为 2951.04nm/rad, 即 51.51nm/°。

假设电机移动方向垂直于初始光栅平面, 电机移动距离 x 、电机和光栅安装板接触到转轴点的距离 l 以及光栅转动角度 α 三者的关系可以表示为

$$\tan \alpha = \frac{x}{l} \quad (5)$$

若电机移动方向与初始光栅平面的法线存在 β 夹角, 如图 4 所示, 式 (5) 可以修正为

$$\tan \alpha = \frac{x}{l} \cos \beta \quad (6)$$

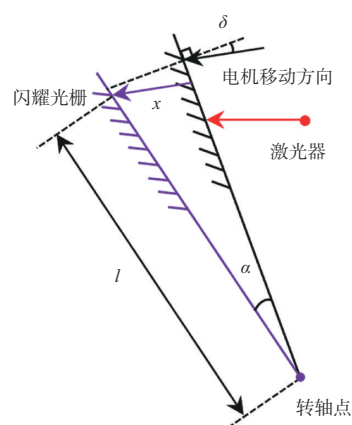


图4 电机移动距离与光栅转动角度示意图

激光器的参数设置如下: 电机和光栅安装板接触到转轴点的距离为 90mm, 电机移动方向和初始光栅平面法线的夹角为 5°。代入式 (6), 电机每移动 1mm, 光栅旋转 0.634°, 由此可知输出波长随电机移动距离的变化为 32.657nm/mm。电机的满载速度为 8mm/s, 因此激光器的调谐速度可达 261.256nm/s。

激光器驱动电流为 100mA 时, 使用光谱仪对不同输出波长下的激光功率进行测量。在实验过程中, 电机以 0.05mm 的位移间距驱动光栅安装板使其绕转轴点旋转, 改变闪耀光栅的角度以及外腔激光器的腔长, 从而改变激光器的输出波长,

达到可调谐的目的。

在此过程中,用光谱仪测量激光的输出光谱,图 5 为激光器的输出波长与电机移动距离的对应关系。波长最大调谐范围为 1542.46~1616.52nm,共 74.06nm,对应电机移动总位移为 2.35mm。波长与电机移动距离的关系线性拟合曲线为 $y=32.06867x+1541.93306$,曲线拟合程度 R^2 为 0.99977,即实验测得的激光输出波长随电机移动距离的变化率为 32.069nm/mm,与模拟计算值 32.657nm/mm 十分接近。

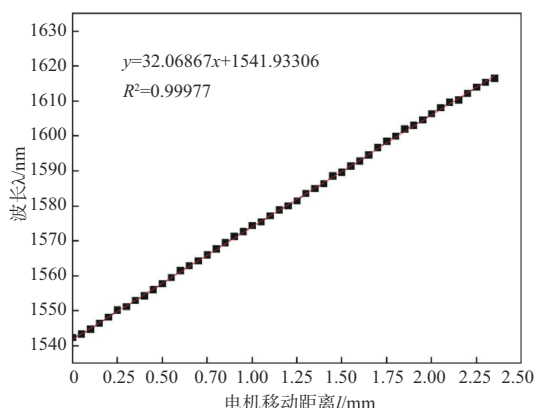


图 5 激光波长随电机移动距离变化

在激光器的输出端连接光谱仪测量得到不同激光输出波长下的功率值,功率与波长的对应关系如图 6 所示,可以看出波长在 1585.02nm 处得到功率最大值 722.457 μ W,功率 3dB 调谐范围为 1551.27 (365.669 μ W)~1610.37nm (352.076 μ W),共 59.10nm。波长调谐范围的中间部分功率大于边缘部分的功率,这是由 SAF 增益芯片的增益谱分布特征决定的,原始增益谱中功率较大的部分集中分布在 1560~1590nm 波长处。此外可以从图中观察到,波长在 1574.39nm 和 1603.14nm 两处的功率出现小幅度的向下波动,原因是在电机驱动光栅安装板运行过程中,机械结构的装配精准度不足。这不仅使光栅一级衍射角发生变化,还会引起光栅平面发生细微的偏移,光栅刻线与准直光束之间的夹角也随之发生变化,进而导致多模、跳模的现象发生,降低了激光器的输出功率。针对这一现象,可以采取以下策略进行优化和改善。首先,对光栅安装板与轴承的连接部位进行强化处理,可选用适配性更高、紧固度更强的连接件。其次,借助精密的调节工具对转轴点位置进行精准调节,使其到达最佳状态。

图 7 为光谱仪测量得到的激光器输出光谱,可以看出激光性能较好,单模输出激光的边模抑制比可达 40dB。

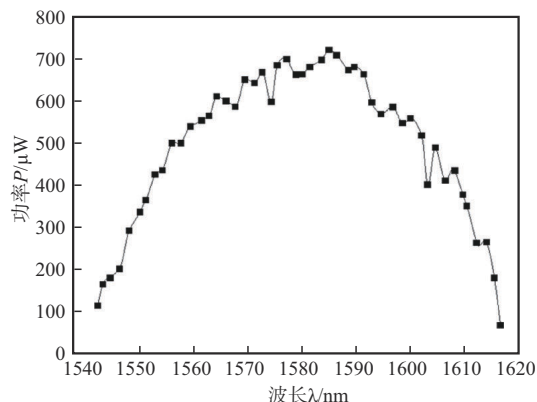


图 6 功率随波长变化曲线

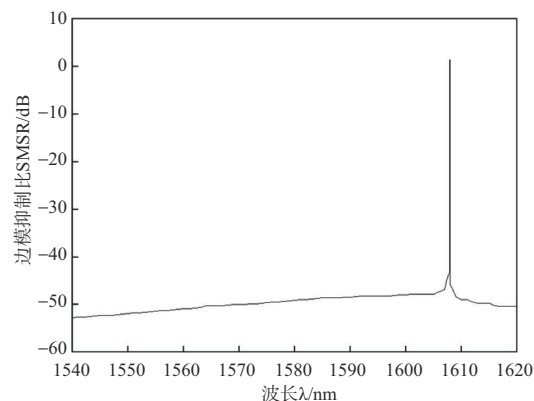


图 7 激光器单模输出光谱

3.2 线宽特性

当两束光未发生干涉时,不会产生干涉条纹,此时总光强为两束光的非相干叠加。当两束光发生干涉时,会呈现出明暗交替的干涉条纹,此时总光强为两束光的相干叠加

$$sI=I_1+I_2+2\sqrt{I_1I_2}\cos\Delta\varphi \quad (7)$$

式中, I 为总光强, I_1 和 I_2 分别为两束光的光强; $\Delta\varphi$ 为两光束之间的相位差。相位差 $\Delta\varphi$ 和光程差 ΔL 之间存在直接的数学关联

$$\Delta\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}\Delta L \quad (8)$$

两束光的光程差越小,干涉现象越明显;当光程差接近激光的相干长度时,干涉强度逐渐减弱;当光程差大于激光的相干长度时,则不再出现干涉现象。相干长度与激光线宽之间的对应关系如下

$$L_c=\frac{c}{\Delta\nu}=\frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (9)$$

式中, L_c 为相干长度; c 为光速; $\Delta\nu$ 和 $\Delta\lambda$ 分别是线宽的频域表达和时域表达。如果激光的线宽较窄,则单色性好,相干长度长,干涉条纹会比较清晰、稳定;而如果线宽较宽,干涉条纹的质量

会降低。通过测量激光器的相干长度,可以得到激光线宽。测量原理图如图8所示。两个光纤耦合器和单模光纤环构成了马赫曾德光纤干涉仪,利用此装置可以测量出外腔式激光器的线宽。激光器的输出激光经过光隔离器后进入50:50耦合器1,其中一束光直接进入50:50耦合器2,另一束光经过一定长度的单模光纤环连接到耦合器2,两束光通过耦合器2进行合束,用AD采集卡对合束后的光信号进行采集。在采集过程中连续调谐激光器的输出波长,观察是否能够采集到干涉信号。改变光纤环的长度,找出能观察到干涉条纹的最大光程差即为相干长度,反推得到激光线宽。

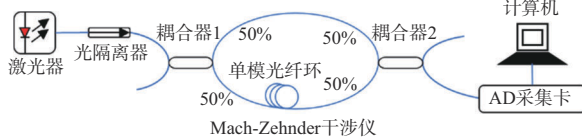


图8 激光器线宽测量原理图

当光纤环长度为1m时,干涉仪的光程差为1.25m,通过AD采集卡收集并读取的信号如图9所示。不同激光输出功率下都可以看到明显清晰的干涉图样,说明激光器的相干长度大于1.25m。

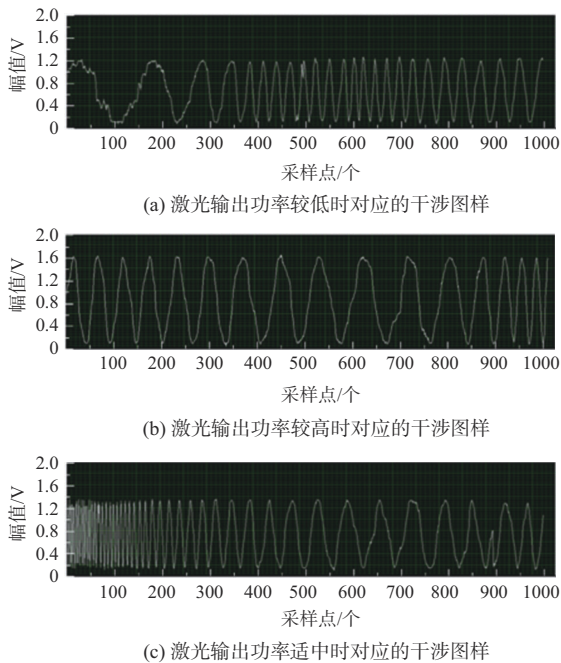


图9 1m光纤环对应的干涉图样

增大光纤环长度重复上述操作。图10为光纤环长度30m(光程差37.5m)时测得的干涉图样。30m光纤环采集到的图样仍有干涉条纹存在,但相较于1m光纤环对应的干涉图样,质量有所下降,此时接近激光器的相干长度。因此激光器的相干长度大于37.5m,线宽小于8MHz(0.064pm)。

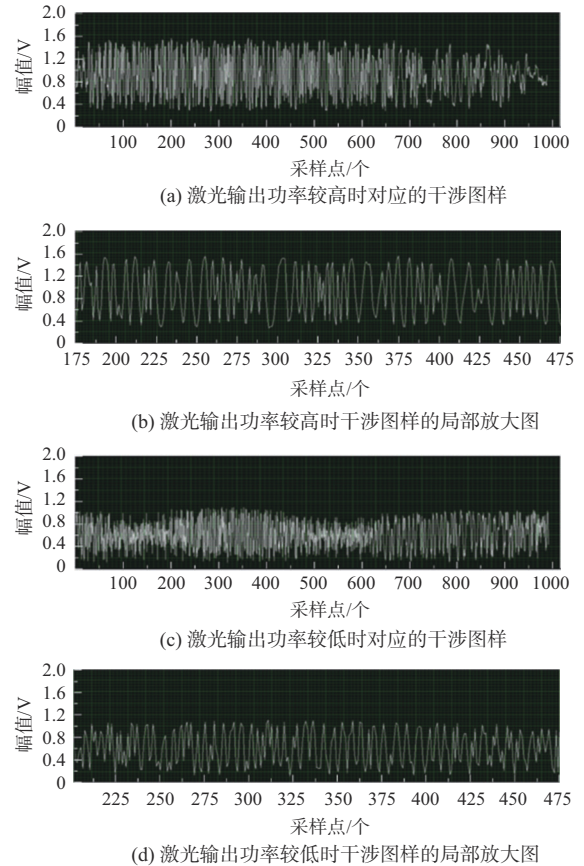


图10 30m光纤环对应的干涉图样

3.3 波长稳定性

保持闪耀光栅角度和外腔长度不变,在不同时间测量激光器在同一驱动电流下的输出波长,可以验证其波长稳定性。在3min内以10s为间隔测量6次波长值,6次测量结果均为1578.72nm,波长波动值为0,说明激光器输出波长的短时稳定性极好。在6h内以0.5h为间隔测量12次波长值,可以验证输出波长的长时稳定性,测量结果如图11所示。12次测量波长的最大值和最小值分别为1578.74nm和1578.72nm,波长波动值为0.02nm,说明激光器在6h内的波长稳定性较好。

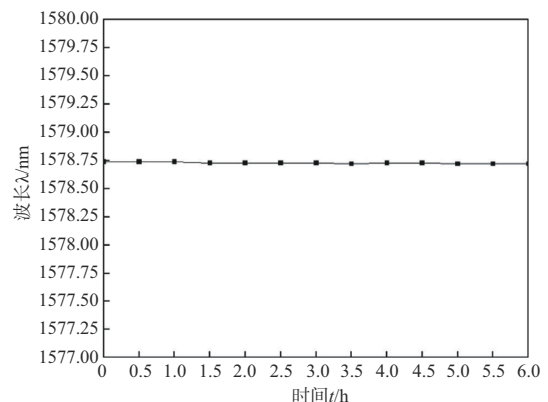


图11 波长稳定性曲线

3.4 功率稳定性

在同一驱动电流下,使用光谱仪测量一段时间内激光器同一波长下的输出功率,可以得到功率变化值。在激光器驱动电流 100mA 下,调整输出波长至 1578.72nm 左右,每隔 0.5h 测量一次激光功率,连续检测 6h,得到外腔式激光器的功率稳定性曲线如图 12 所示。在 6h 内,激光输出的最大功率为 713.344 μ W,最小功率为 702.447 μ W,功率最大变化值为 10.897 μ W,6h 内的功率稳定性优于 1.56%。

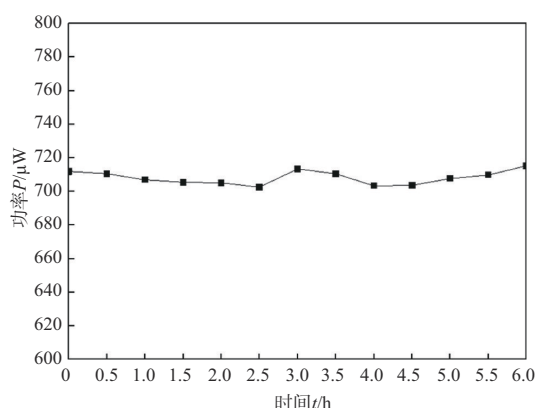


图 12 功率稳定性曲线

4 结 论

本文成功研发了一款基于国产元件的 Littrow 型外腔式可调谐半导体激光器。通过对外腔结构的优化设计,激光器实现了 74.06nm 的波长调谐范围,同时具有小于 8MHz 的窄线宽、大于 40dB 的边模抑制比及大于 261.256nm/s 的调谐速度。这标志着外腔式可调谐半导体激光器的国产化迈出了重要一步,接下来的研究将致力于性能更加稳定、造价更加低廉的集成化系统,以适应更多应用场景。

参考文献:

[1] 陈家璧,彭润玲.激光原理及应用[M].北京:电子工业出版社

社,2004:210—216.

Chen Jiabi, Peng Runling. Principles and applications of lasers [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2004:210—216.

[2] 张茜,王平.激光传感自适应的装配式建筑机器人轨迹规划[J].光学技术,2024,50(5):598—605.

Zhang Qian, Wang Ping. Trajectory planning of prefabricated building robot based on laser sensing adaptive method[J]. Optical Technique, 2024, 50(5):598—605.

[3] 牛满钝,贾文祺,王树伦,等.基于光束分析的高功率激光切割头光路优化[J].光学技术,2024,50(2):146—149.

Niu Mandun, Jia Wenqi, Wang Shulun, et al. Optical path optimization of a high-power laser cutting head based on beam analysis[J]. Optical Technique, 2024, 50(2):146—149.

[4] Yu S, Zhang Z, Li M, et al. Multi-frequency differential absorption lidar incorporating a comb-referenced scanning laser for gas spectrum analysis[J]. Optics Express, 2021, 29(9):12984—12995.

[5] Bayrakci, Ismail. External cavity diode laser-based off-axis cavity enhanced absorption spectroscopy in the spectral range between 1000 nm and 1620 nm for trace gas measurements[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2015, 23(4):237—243.

[6] Andreev S N, Mironchuk E S, Nikolaev I V, et al. High precision measurements of the $^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$ isotope ratio at atmospheric pressure in human breath using a 2 μm diode laser[J]. Applied Physics B, 2011, 104(1):73—79.

[7] Kudenov M W, Pantalone B, Yang R. Dual-beam potassium Voigt filter for atomic line imaging[J]. Applied Optics, 2020, 59(17):5282—5289.

[8] Zhuang W, Chen J. Active Faraday optical frequency standard [J]. Optics Letters, 2014, 39(21):6339—6342.

[9] Hang G, Ari N, Tal G, et al. Widely-tunable, narrow-linewidth III-V/silicon hybrid external-cavity laser for coherent communication[J]. Optics Express, 2018, 26(7):7920.

[10] Sacher Lasertechnik Group. Littrow next generation: Tunable diode lasers [EB/OL]. (2023-10-10) [2025-02-19]. https://www.sacher-laser.com/home/scientific-lasers/tunable_lasers/littrow/littrow_next_generation.html.

[11] Toptica Photonics AG. DL pro: Tunable Diode Lasers [EB/OL]. (2023-10-10). [2025-02-19]. <https://www.toptica.com/products/tunable-diode-lasers/ecdl-dfb-lasers/dl-pro/>.