

谐振式光纤陀螺用激光器性能研究

李建华, 于怀勇, 吴衍记, 雷明

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要: 谐振式光纤陀螺是实现小型化的潜在方案, 而激光器为谐振式光纤陀螺系统中的关键器件之一。为全面掌握激光器的性能, 根据谐振式光纤陀螺对激光器的要求, 制定了基于 LabVIEW 激光器性能自动化测试的软硬件设计方案, 得到激光器分段线性化的模型, 控制电流在 90~120mA 之间变化时, 光功率、中心波长近似呈变化率为 0.18mW/mA、0.11pm/mA 的线性变化; 控制温度在 28.1~32.9℃ 之间变化时, 激光器光功率、中心波长近似呈变化率为 0.25dBm/℃、13.31pm/℃ 的线性变化; 此外, 光功率变化率为 0.17%, 中心波长的变化率为 0.26×10^{-6} , 具备稳定性特性。

关键词: 谐振式光纤陀螺; 半导体激光器; 自动化测试平台; 性能测试

中图分类号: TN629.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2016)02-0071-06

Research on Laser Performance of Resonator Fiber Optical Gyroscope

LI Jian-hua, YU Huai-yong, WU Yan-ji, LEI Ming

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: Resonator fiber optical gyroscope (RFOG) is a solution for miniaturization, and the laser source is one of the key components in RFOG. According to RFOG performance requirements, a laser performance automated test LabVIEW program was developed, which obtained the subsection linearization model of the laser. When laser control current was change from 90mA to 120mA, power and center wavelength were linear change, and rate of change were 0.18mW/mA and 0.11pm/mA; When laser control temperature was change from 28.1℃ to 32.9℃, power and center wavelength were linear change, and rate of change were 0.25dBm/℃ and 13.31pm/℃; moreover, power and center wavelength were having stability characteristics, whose rate of change were 0.17% and 0.26ppm.

Key words: Resonator fiber optical gyro; Semiconductor laser; Automated test platform; Performance test

0 引言

谐振式光纤陀螺的工作原理表明较短的光纤谐振腔便可实现高精度的检测, 因此, 谐振式光纤陀螺是光学陀螺实现小型化发展的一个方向^[1-2]。激光器作为谐振式光纤陀螺系统中的关键器件之一, 对谐振式光纤陀螺测量精度有着重大影响。谐振式光纤陀螺检测原理表明激光器锁频精度决定着谐振式光纤陀螺对旋转角速度测量的

实现, 要求激光器具备波长可调谐的特点^[3-4]; 激光器的线宽决定着谐振曲线的清晰度, 要求激光器线宽小于 1MHz^[5], 具备窄线宽特点。

半导体激光器作为一种具有高转换效率直接电-光转换器件, 具有体积小、可调谐等潜在优势^[6]。2009年, Rio公司研发出世界上线宽最窄外腔半导体激光器, 输出线宽小于 3kHz (6×10^{-9} nm)^[7]。该公司产品已经进入工程实用化阶段, 兼具小体积与可调谐的优点, 为其应用于谐

收稿日期: 2015-08-13; 修订日期: 2015-10-15。

作者简介: 李建华(1990-), 男, 硕士, 主要从事光纤陀螺的研究。

振式光纤陀螺提供有力支撑。

为全面掌握外腔半导体激光器性能指标, 本文设计基于 LabVIEW 虚拟平台的测试系统, 并详细描述测试过程及数据处理结果。半导体激光器性能的掌握, 为其应用于谐振式光纤陀螺提供参数指导。

1 谐振式光纤陀螺用半导体激光器基本原理

半导体激光器工作物质为半导体材料, 因受激发而产生光束。理论上, 激光器发射光束必须满足两个条件: 粒子数反转条件, 即满足高能态粒子数必须多于低能态粒子数, 才能实现对光子的增益放大; 阈值条件, 即要求粒子数反转产生的增益达到大于全部损耗的程度^[8]。

(1) 粒子数反转条件

要使半导体中分布在不同能带上的电子产生净受激发射, 需要导带的电子数量大于价带的电子数量, 即满足伯纳德-杜拉福格条件

$$F_c - F_v > h\nu \geq E_g \quad (1)$$

其中, F_c 为导带准费米能级, F_v 为价带准费米能级, $h\nu$ 为光子能量, E_g 为禁带宽度。其物理意义为, 当导带与价带准费米能级之差大于或者等于禁带宽度, 才能实现半导体中粒子数反转。

(2) 阈值条件

如前所述, 粒子数反转到一定程度激光器才能发出光束, 即要满足阈值条件

$$g_{th} = \alpha_i + \alpha_{out} \quad (2)$$

其中, g_{th} 为阈值增益, α_i 为增益介质内部损耗, α_{out} 为输出损耗。由此可知, 激光器有净增益的条件是激光的增益大于总的损耗, 此时激光器才会有辐射输出。

外腔半导体激光器具备窄线宽和可调谐的优点^[9], 满足谐振式光纤陀螺对激光器的基本要求, 具有应用于谐振式光纤陀螺的潜力, 其特性实现机理如下所述。

(1) 半导体激光器窄线宽的特性

半导体激光器的线宽 $\Delta\lambda$ 决定方程为

$$\Delta\lambda = \frac{-\lambda^2}{nL \left(1 - \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right)} \quad (3)$$

式中, λ 为单纵横模在真空中的波长, n 为介

质的折射率, L 为腔长, $dn/d\lambda$ 为色散。由此可知腔长 L 是影响激光器线宽的关键因素, 加外腔起到增加腔长的作用, 因此可以压窄激光器的线宽。另外, 自发辐射导致的光强起伏和相位变化, 会导致折射率的波动, 造成激光器线宽展宽, 而外腔反馈通过增加受激辐射来抑制自发辐射, 从而降低激光器线宽展宽, 进一步压窄线宽。

(2) 半导体激光器可调谐的特性

半导体激光器布拉格光栅的中心波长 λ_B 与材料有效折射率 n_{eff} 的关系为

$$\lambda_B = 2n_{eff}T \quad (4)$$

其中, T 为布拉格光栅的周期。由式 (4) 可知波长变化量正比于折射率的变化量。半导体激光器频率的调谐主要包括两条途径: 热调谐和电调谐。热调谐的物理机理可理解为利用半导体激光器上的加热器, 通过改变局部温度的变化引起折射率的改变, 即利用温度与能隙的依赖关系实现频率调谐; 电调谐的原理是利用注入电流对自由载流子浓度的影响, 引起等离子色散效应, 进而改变材料的有效折射率实现频率的调谐。

2 半导体激光器测试方法及实现

(1) 半导体激光器测试系统硬件设计

半导体激光器性能测试平台如图 1 所示。该测试平台可实现激光器性能指标自动化测量, 具体过程为利用计算机上的测试程序设定温度/电流的变化范围及变化快慢, 驱动器接收相应的控制信号实现窄线宽激光器的控制, 通过光功率计/波长计测试光功率/中心波长的大小, 并将测试数据反馈给上位机实现测量数据的在线处理。

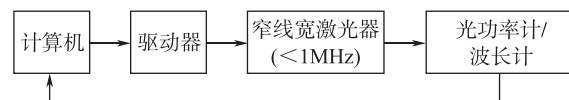


图 1 半导体激光器性能测试平台示意图

Fig. 1 Semiconductor laser performance test platform schematic

(2) 半导体激光器测试系统软件设计

传统的激光器测试系统, 无法实现多个激光器多个性能指标的同步测量, 且数据量大不利于在线处理, 此外人为操作也会带来实验结果的不稳定。为克服传统测量方法的缺点, 实现半导体

激光器性能的快速精准测量, 利用 LabVIEW 虚拟器的强大功能进行远程控制实验, 设计了基于 LabVIEW 虚拟平台的自动化测试系统, 图 2 为光源参数测量示意图, 主要包括驱动电流控制模块、温度控制模块、光功率测量模块、中心波长测量模块和数据处理及显示模块共计五个模块。其中驱动电流控制模块和温度控制模块分别控制驱动器电流和温度的变化范围及变化速度, 进而实现对激光器的控制; 光功率测量模块可实时读取光功率计的测量值, 中心波长测量模块可实时读取波长计的测量值, 实现激光器光功率和中心波长的同步测量。此后, 通过数据处理及显示模块进行数据的在线处理和显示, 得到激光器性能指标包括光功率随电流变化的 $I-P$ 特性、光功率随温度变化的 $T-P$ 特性、中心波长随温度变化的 $T-\lambda$ 特性、中心波长随电流变化的 $I-\lambda$ 特性等。

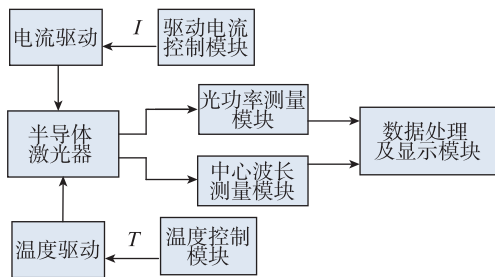


图 2 光源参数测量示意图

Fig. 2 Semiconductor laser parameters testing schematic

(3) 半导体激光器实验系统

利用上述设计的半导体激光器软硬件测试系统, 搭建的半导体激光器实验测试系统如图 3 所示, 主要可实现激光器光功率和中心波长与控制电流和温度变化关系的测量。

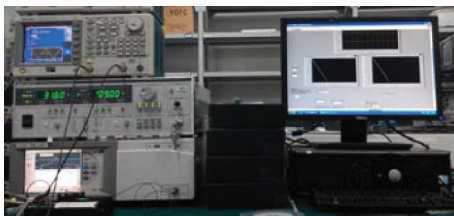


图 3 激光器试验系统示意图

Fig. 3 Semiconductor laser performance test system schematic

3 半导体激光器性能测试及数据分析

利用上述软硬件测试平台对激光器进行性能指标的测量, 得到激光器光功率随电流变化的 $I-P$ 特性、光功率随温度变化的 $T-P$ 特性、中心波长随电流变化的 $I-\lambda$ 特性、中心波长随温度变化的 $T-\lambda$ 特性及光功率与中心波长稳定性特性。

(1) 半导体激光器 $I-P$ 特性

激光器控制电流在 $0 \sim 120\text{mA}$ 之间变化时, 测得电流与光功率之间的 $I-P$ 关系如图 4 所示。总体上, 激光器的光功率随着电流的增大而增大, 电流小于 30mA 时, 光功率基本不随电流的增大而变化, 仅从 0 增加到 0.5mW ; 电流从 30mA 增加到 90mA 时, 光功率变化速度加快; 随着电流的加大, 光功率近似呈线性增长, 电流达到 120mA 时, 光功率为 13.1mW , 激光器的工作点应位于 $90 \sim 120\text{mA}$ 的线性区, 光功率与电流的表达式为

$$P = 0.18I - 8.8, 90 \leq I \leq 120 \quad (5)$$

由式 (5) 知电流增加 1mA , 光功率增加 0.18mW , 因此可通过电流的调节实现光功率的控制。

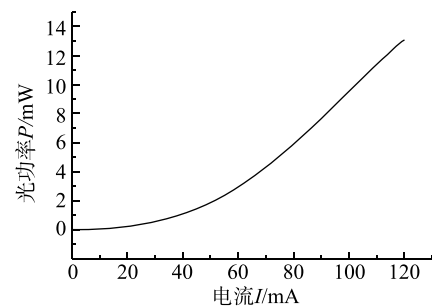
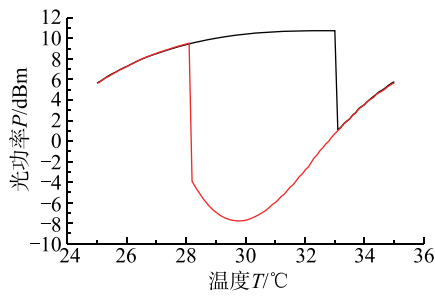


图 4 激光器 $I-P$ 关系示意图

Fig. 4 Laser $I-P$ relationship schematic

(2) 半导体激光器 $T-P$ 特性

将激光器控制温度先从 25°C 升高到 35°C , 再将温度进行反向变化, 测得激光器光功率随温度变化的 $T-P$ 关系如图 5 所示, 包括升温曲线及降温曲线两部分。对于升温曲线, 开始阶段随着温度的升高, 激光器的光功率逐渐增大, 当温度增加到 32.9°C 时, 光功率达到最大值 10.87dBm , 随着温度的继续升高, 光功率出现拐点突然降低为 1.24dBm , 此后光功率随着温度的升高继续增大, 但不会超越先前的最大值; 对于降温曲线, 开始

图5 激光器 T - P 关系示意图Fig. 5 Laser T - P relationship schematic

时光功率随着温度的降低而降低, 当温度为 29.8°C 时, 光功率达到最小值 -7.77dBm , 随着温度的继续降低光功率开始增长, 当温度降低到 28.1°C 时, 光功率突然增大, 跳变到 9.53dBm , 此后光功率随着温度的降低而降低。因此, 为避免光功率的突然减小, 须将温度控制在 32.9°C 以内, 防止半导体激光器在降温曲线运行。升降温阶段光功率与温度之间的表达式为

$$P = \begin{cases} 1.24T - 24.91, & 25 \leq T \leq 28 \\ 0.25T + 2.79, & 28.1 \leq T \leq 32.9 \\ 2.50T - 81.27, & 33 \leq T \leq 35 \end{cases} \quad (6)$$

$$P = \begin{cases} 1.27T - 26.08, & 25 \leq T \leq 28 \\ -2.55T + 67.31, & 28.1 \leq T \leq 29.7 \\ 2.92T - 95.96, & 29.8 \leq T \leq 35 \end{cases} \quad (7)$$

由式 (6)、式 (7) 可知, 升降温阶段光功率有不同的变化趋势, 温度对光功率有着不同的影响。激光器的温度工作点在升温曲线 $28.1 \sim 32.9^{\circ}\text{C}$ 之间时, 光功率大且随温度变化的变化率最小, 温度每升高 1°C 光功率增加 0.25dBm , 易于实现光功率的控制。

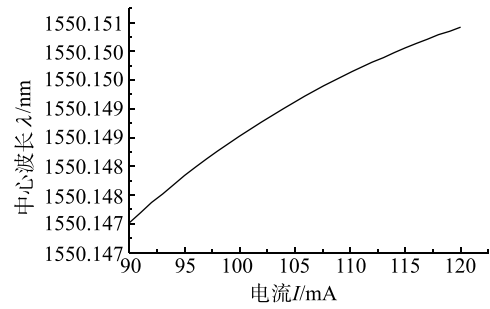
(3) 半导体激光器 I - λ 特性

激光器控制电流在 $90 \sim 120\text{mA}$ 之间变化, 测得电流与中心波长之间 I - λ 关系如图 6 所示。电流在 $90 \sim 120\text{mA}$ 之间变化时, 中心波长与控制电流呈线性正相关, 其表达式为

$$\lambda = 0.00011I + 1550.13794, \quad 90 \leq I \leq 120 \quad (8)$$

由式 (8) 可见, 激光器控制电流与中心波长线性表达式的斜率为 $0.11\text{pm}/\text{mA}$, 对应激光器中心频率的变化为 $13.75\text{MHz}/\text{mA}$ 。因此, 可通过控

制电流的大小实现激光器中心波长精细化控制。

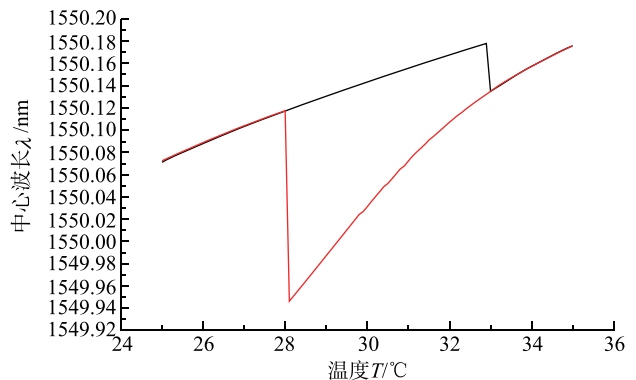
图6 激光器 I - λ 关系示意图Fig. 6 Laser I - λ relationship schematic

(4) 半导体激光器 T - λ 特性

激光器温度进行 25°C 到 35°C 的升降温控制, 得激光器中心波长随温度变化 T - λ 关系如图 7 所示。对于升温特性, 温度从 25°C 增大到 32.9°C 时, 激光器中心波长近似线性的从 1550.07126nm 增大到 1550.17802nm , 温度继续增加, 激光器中心波长突降为 1550.13493nm , 此后随温度的增加而增大; 降温时, 当温度从 35°C 降低为 28.1°C , 激光器中心波长从 1550.17585nm 减小为 1549.94623nm , 当温度继续降低, 激光器中心波长突然升高为 1550.11766nm , 此后随温度降低而减小。升温阶段及降温阶段中心波长与温度之间的表达式为

$$\lambda = \begin{cases} 0.01331T + 1549.74289, & 25 \leq T \leq 32.9 \\ 0.02054T + 1549.45824, & 33 \leq T \leq 35 \end{cases} \quad (9)$$

$$\lambda = \begin{cases} 0.01503T + 1549.69783, & 25 \leq T \leq 28 \\ 0.03367T + 1549.01840, & 28.1 \leq T \leq 35 \end{cases} \quad (10)$$

图7 激光器 T - λ 关系示意图Fig. 7 Laser T - λ relationship schematic

升温曲线与降温曲线及各自的不同阶段, 温度对中心波长有不同程度的影响。为避免中心波长大幅度的波动, 应避免激光器进入降温曲线, 温度在 28.1~32.9℃变化时, 升温曲线拐点出现之前中心波长与温度之间的表达式为

$$\lambda = 0.01331T + 1549.74289, 28.1 \leq T \leq 32.9 \quad (11)$$

由式(11)可知激光器中心波长随温度变化的斜率为 0.01331nm, 即温度每升高 1℃激光器中心波长变化 13.31pm, 对应 1663.75MHz/℃。可见温度变化是影响激光器中心波长的关键因素, 通过控制温度可实现激光器中心波长粗调。

(5) 半导体激光器光功率/中心波长稳定性

将激光器电流与温度固定在 110mA 与 30.5℃, 测得其光功率及中心波长稳定性曲线如图 8 所示。测量所得光功率的均方差为 3.25×10^{-6} mW, 平均值为 11.48mW, 最大值为 11.49mW, 最小值为 11.47mW, 波动率为 0.17%; 测量所得中心波长的均方差为 0.00857924pm, 平均值为 1550.150883nm, 最大值为 1550.1511nm, 最小值为 1550.1507nm, 波动率为 2.58039×10^{-7} 。由此可知, 激光器光功率的波动率小于 1%, 波长的波动

率处于 0.1×10^{-6} 的量级, 满足光功率与中心波长稳定性的要求。

在此基础上, 对该公司同批次产品进行测量, 光功率、中心波长随电流、温度变化有相似的变化模型, 可通过分段线性化的方式获得它们之间的变化关系。

4 结论

本文设计了人机界面友好、操作简单、稳定性高的激光器自动化测试平台, 并对激光器测量的数据进行科学的处理, 得到如下结论:

1) 该型激光器可通过线性化的方式获得光功率、中心波长随电流的变化率, 通过分段线性化的方式获得光功率、中心波长随温度的变化率, 从而建立激光器性能参数的模型。

2) 分析可得本文激光器详细性能参数为:

① 激光器电流在 90~120mA, 温度在 28.1~32.9℃的范围内变化时, 光功率、中心波长与电流、温度近似呈线性正相关;

② 在线性区间内, 激光器光功率随电流、温度的变化率分别为 0.18mW/mA、0.25dBm/℃; 中心波长随电流、温度的变化率分别为 0.11pm/mA、13.31pm/℃, 对应中心频率的变化率为 13.75MHz/mA、1663.75MHz/℃;

③ 激光器电流与温度工作点在 110mA 与 30.5℃时, 光功率的波动率小于 1%, 波长的波动率处于 0.1×10^{-6} 的量级, 满足光功率与中心波长稳定性的要求。

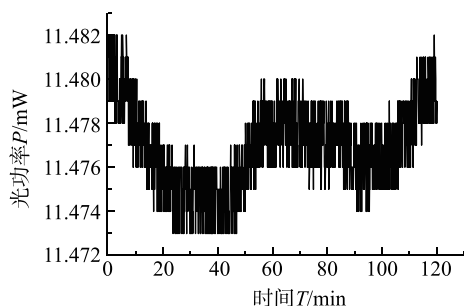


图 8 (a) 激光器功率稳定性示意图

Fig. 8 (a) Laser power stability schematic

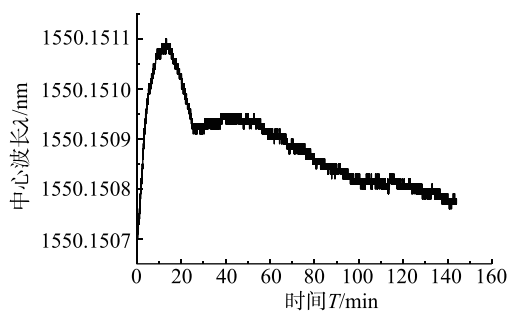


图 8 (b) 激光器波长稳定性示意图

Fig. 8 (b) Laser wavelength stability schematic

参考文献

- [1] 于怀勇, 吴衍记, 雷明, 李宗利. 硅基波导谐振腔特性分析与实验研究[J]. 导航定位与授时, 2015, 2 (2): 46-53.
- [2] 李建华, 于怀勇, 雷明, 等. 谐振式光子晶体光纤陀螺环路建模与仿真[J]. 导航定位与授时, 2015, 2 (5): 58-62.
- [3] 洪灵菲, 张春熹, 冯丽爽, 等. 谐振式微光学陀螺频率跟踪与锁定技术研究[J]. 中国激光, 2011, 38 (9): 103-107.
- [4] 鲍慧强, 毛慧, 马慧莲, 等. 谐振式微型光学陀螺锁频精度分析[J]. 浙江大学学报, 2010, 44 (1): 94-98.
- [5] 于怀勇. 谐振式集成光学陀螺谐振腔设计及噪声分析[D]. 北京航空航天大学, 2012: 10-61.
- [6] Bob Shine. Tunable diode lasers stand up to research and commercial applications [J]. Photonics Spectra, 1999, 33 (1):

- 102-105.
- [7] 李元栋, 华卫红, 王红岩, 杨子宁. 谱宽压窄大功率半导体激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(9): 36-41.
- [8] 张文甲. 光栅外腔可调谐半导体激光器的外腔反馈特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013: 9-15.
- [9] 金杰, 郭曙光, 吕福云, 张光寅. 窄线宽可调谐外腔半导体激光器的研究[J]. 河北工业大学学报, 2000, 29(1): 87-90.