

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.06.018

谐振式光纤陀螺用激光器最优工作区间探究

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:激光器为谐振式光纤陀螺(R-FOG)的关键器件,根据 R-FOG 对激光器的要求,提出了一种 R-FOG 用激光器最佳工作及最优工作区间的确立方法,制定了激光器性能自动化测试方案,得到激光器光功率、中心波长与电流、温度的变化关系。由此推导出 2 个激光器电流与温度的最佳工作点,并利用拍频检测原理确立 2 个激光器电流与温度的最优工作区域。激光器最优工作区域的掌握,为其应用于 R-FOG 提供了详实的参数指标。

关键词:谐振式光纤陀螺;半导体激光器;最佳工作点;最优工作区间

中图分类号:TN629

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2017)06-0107-06

Research on Laser Optimum Work Area 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: Laser source is one of the key components in resonator fiber optical gyroscope (R-FOG). According to the R-FOG requirements to the laser, a method to establish laser optimum working point and optimum working area of R-FOG was proposed. A laser performance test program was developed, through which the relationship between the light power, center wavelength, current and temperature were obtained. On this condition, the optimum current and temperature working points of two lasers were presented, and the beat detection principle was used to establish optimum current and temperature work area of two lasers. To master laser optimum work area provides detailed parameter index for which applied in R-FOG.

Key words: Resonator fiber optical gyroscope; Semiconductor laser; Best work point; Optimum work area

0 引言

小型洲际导弹、小型化飞航导弹等武器系统快速发展,迫切需要一种小型化高精度的陀螺,而谐振式光纤陀螺具备在小体积下实现高精度的潜力^[1-3]。激光器为 R-FOG 的关键器件,需要具备窄线宽与可调谐的特点,但此种激光器往往体积较大^[4]。因此,寻找一种窄线宽可调谐的小型化激光器对于实现小型化 R-FOG 特别重要。

外腔半导体激光器窄线宽可调谐及小型化的

优良特性^[5-7],具备利用拍频方式检测旋转角速度 R-FOG 的潜力,这就需全面掌握 2 个外腔半导体激光器的性能指标。本文利用基于 LabVIEW 的虚拟测试平台,对 2 个外腔半导体激光器进行详细的测量,在此基础上推导出其最佳工作点及最优工作区域。外腔半导体激光器性能的掌握,对其应用于 R-FOG 具有指导意义。

1 拍频检测基本理论

两束不同激光的复振幅表达式为^[8-9]:

收稿日期:2016-10-23;修订日期:2017-04-01

作者简介:李建华(1990-),男,硕士,主要从事光纤陀螺的研究。E-mail:15710065879@163.com

$$E_1(t) = E_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) \tag{1}$$

$$E_2(t) = E_2 \cos(\omega_2 t + \varphi_2)$$

其中, E 为振幅, ω 为频率, φ 为相位。两束在空间传播的激光重合时, 若其相位关系固定, 则可产生拍频。两束光振幅相等时, 可合成为

$$E = E_1 + E_2 = 2E_0 \cos\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t + \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t + \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}\right) \tag{2}$$

在实际探测过程中, 需要 $\omega_1 - \omega_2$ 处于探测器截止频率以内才可以响应, 这就要求两束激光波长尽可能接近, 从而使 $|\omega_1 - \omega_2|$ 小于 $1\text{GHz}^{[10]}$ 。

波长、频率与光速三者乘积关系为 $\nu = c/\lambda$, 两边求一阶导数, 得

$$\Delta\nu = \left(-\frac{c}{\lambda^2}\right) \Delta\lambda \tag{3}$$

由式(3)计算可得, 对于波长在 1550nm 附近的光波, 若使 $|\omega_1 - \omega_2|$ 小于 1GHz , 需要波长差小于 8.20pm 。

2 半导体激光器测试方法及最佳工作点分析

2.1 半导体激光器测试方法设计

为快速精确实现半导体激光器性能的测试, 设计了如图1所示的测试平台。上位机通过驱动器可控制多个激光器的电流和温度, 发出的光束经过耦合器分光之后可实现激光器多个参数指标的测量。利用此设计方案搭建的测试系统可实现多个激光器多个性能指标的同步测量。

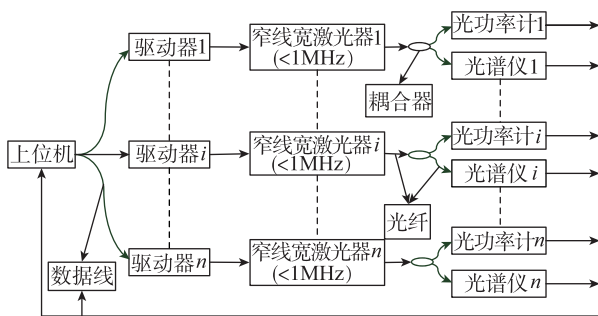


图1 激光器性能测试平台示意图

Fig. 1 Laser performance test platform schematic

2.2 半导体激光器最佳工作点分析

(1) 半导体激光器电流最佳工作点

半导体激光器光功率随电流变化的曲线如图2所示, 光功率随着电流的增大而增加。当控制电流

在 I_{\min} 与 I_{\max} 之间变化时, 光功率与电流近似呈线性关系, 易于实现光功率的控制。因此半导体激光器的最佳工作点在线性区间的中点 I_p 附近。半导体激光器电流最佳工作点表达式为

$$I_p = \frac{I_{\min} + I_{\max}}{2} \tag{4}$$

式中, I_{\min} 为光功率随电流线性变化的起点, I_{\max} 为激光器电流最大值。

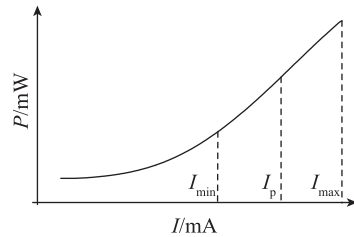


图2 半导体激光器 I-P 关系示意图

Fig. 2 Semiconductor laser I-P relationship schematic

(2) 半导体激光器温度最佳工作点

半导体激光器光功率随温度变化的曲线如图3所示, 升温过程与降温过程光功率随温度变化有不同的趋势。降温曲线光功率较小, 半导体激光器温度工作点需在升温曲线上选择。升温曲线中光功率随温度升高的拐点(光功率突变)为 T_{\max} , 降温曲线光功率随温度降低的拐点为 T_{\min} , 半导体激光器温度的最佳工作点为2个拐点的中点 T_p , 该点附近光功率较大且随温度近似呈线性变化, 易于实现光功率的控制。半导体激光器温度最佳工作点的表达式为

$$T_p = \frac{T_{\min} + T_{\max}}{2} \tag{5}$$

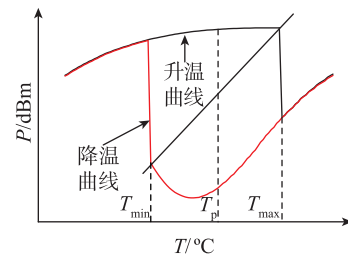


图3 半导体激光器 T-P 关系示意图

Fig. 3 Semiconductor laser T-P relationship schematic

3 半导体激光器性能测试及确立工作区间

3.1 性能测试

利用上述的激光器测试平台, 分别对2个激光

器进行测量,得到半导体激光器特性如下。

(1) 半导体激光器 $I-P$ 特性

以 0.5°C 为步长将激光器一的控制温度设定在 $25^\circ\text{C} \sim 35^\circ\text{C}$ 之间的定值,测得电流与光功率之间的 $I-P$ 关系如图 4 所示,电流的测试范围为 $0 \sim 120\text{mA}$ 。总体上,激光器的光功率随着电流的增大而增大,其中温度为 25°C 时,当电流增加到 110mA 后,光功率达到最大值并趋于平稳,不再随着电流的增加而增大;温度高于 33.5°C 时,随着电流的增加,激光器出现消光现象(光功率突然大幅度降低),此后光功率随着电流的增加而增加,且设定温度越高,消光现象出现的越早。以温度为 30.5°C 为例,电流在 $90 \sim 120\text{mA}$ 之间变化时,激光器光功率随电流近似线性增大,两者之间的表达式为

$$P = 0.18I - 8.8, \quad 90 \leq I \leq 120 \quad (6)$$

由式(6)可知光功率随电流增加的变化率为 $0.18\text{mW}/1\text{mA}$,因此调节电流的变化可实现光功率的控制。该半导体激光器的最大电流为 130mA ,由式(4)可知其最佳电流工作点为 110mA 。此外,随着温度设定值的升高,表现为 $I-P$ 特性的上升,可见光功率同时会受到温度改变的影响,温度是控制光功率的另一重要因素。

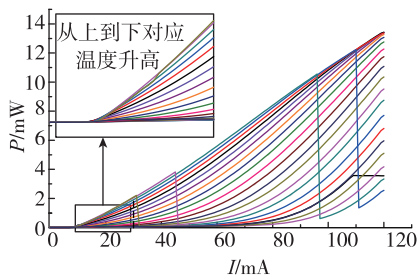


图 4 激光器一 $I-P$ 关系示意图
Fig. 4 $I-P$ relationship schematic of laser I

将温度设定在以 0.5°C 为步长 $21^\circ\text{C} \sim 31^\circ\text{C}$ 的范围内,测得激光器二的 $I-P$ 关系图如图 5 所示,与激光器一有着类似的变化趋势,同理可得其电流的最佳工作点为 113mA 。 26°C 时,光功率与电流的表达式为

$$P = 0.17I - 9.5, \quad 100 \leq I \leq 120 \quad (7)$$

(2) 半导体激光器 $T-P$ 特性

将激光器一的控制电流设为定值,以 0.5mA 为步长在 $109 \sim 111\text{mA}$ 之间设定,测得激光器光功率随温度变化的 $T-P$ 关系如图 6 所示,包括升温曲线及降温曲线两部分。总体上,升温时光功率先随

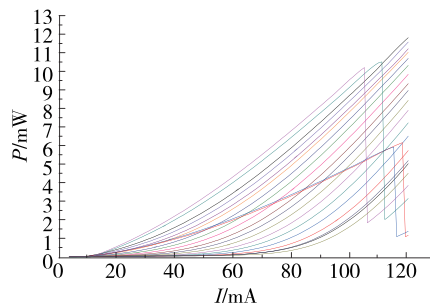


图 5 激光器二 $I-P$ 关系示意图
Fig. 5 $I-P$ relationship schematic of laser II

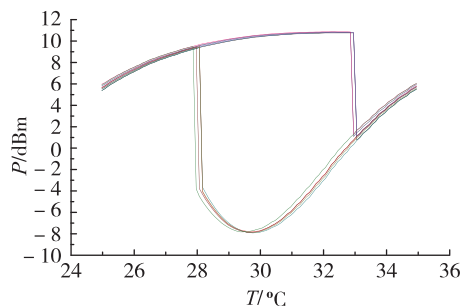


图 6 激光器一 $T-P$ 关系示意图
Fig. 6 $T-P$ relationship schematic of laser I

着温度的升高而增大,当温度增加到一定值后会出现突然减小的拐点,然后随着温度的升高而增大;降温时光功率随着温度的降低而减小,当温度减小到一定值后会出现突然增大的拐点,然后随着温度的降低而减小;在升温曲线拐点之后与降温曲线拐点之后的部分,升降温曲线近似重合。以电流为 110mA 时的 $T-P$ 关系线进行分析,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,避免光功率的突然减小。驱动电流为 110mA 时,升温阶段及降温阶段光功率与温度之间的表达式为:

$$P_{\text{升}} = \begin{cases} 1.24T - 24.91, & 25 \leq T \leq 28 \\ 0.25T + 2.79, & 28.1 \leq T \leq 32.9 \\ 2.50T - 81.27, & 33 \leq T \leq 35 \end{cases} \quad (8)$$

$$P_{\text{降}} = \begin{cases} 1.27T - 26.08, & 25 \leq T \leq 28 \\ -2.55T + 67.31, & 28.1 \leq T \leq 29.7 \\ 2.92T - 95.96, & 29.8 \leq T \leq 35 \end{cases} \quad (9)$$

由式(8)、式(9)可知,升降温阶段光功率有不同变化趋势,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 $28.1^\circ\text{C} \sim 32.9^\circ\text{C}$ 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,可选为工作区间。升温曲线与降温曲线的拐点温度分别为 32.9°C 与 28.1°C ,由式(5)可知半导

体激光器温度最佳工作点为 30.5°C 。

将电流设定在以 0.5mA 为步长的 $112\sim 114\text{mA}$ 范围内,激光器二的 T - P 关系图如图 7 所示,与激光器一有着类似的变化趋势。驱动电流为 113mA 时,升降温曲线光功率与温度之间的表达式为:

$$P_{\text{升}} = \begin{cases} 1.14T - 17.97, & 21 \leq T \leq 22.9 \\ 0.39T - 0.49, & 23 \leq T \leq 29 \\ 1.75T - 48.08, & 29.1 \leq T \leq 31 \end{cases} \quad (10)$$

$$P_{\text{降}} = \begin{cases} 1.19T - 19.42, & 21 \leq T \leq 23 \\ -3.26T + 70.69, & 23.1 \leq T \leq 24.6 \\ 2.74T - 77.55, & 24.7 \leq T \leq 31 \end{cases} \quad (11)$$

由式(10)、式(11)得激光器二温度的最优工作范围为 $23^{\circ}\text{C}\sim 29^{\circ}\text{C}$,最佳温度工作点为 26°C 。

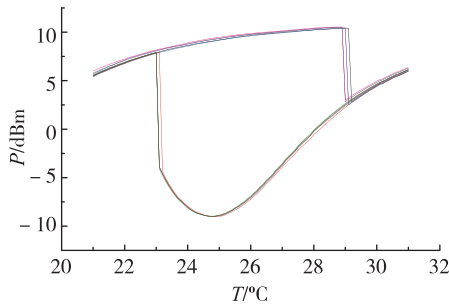


图 7 激光器二 T - P 关系示意图

Fig. 7 T - P relationship schematic of laser II

(3) 半导体激光器 I - λ 特性

激光器一的控制温度以 0.5°C 为步长在 $29.5^{\circ}\text{C}\sim 31.5^{\circ}\text{C}$ 之间设定,测得电流与中心波长之间的 I - λ 关系如图 8 所示,电流的测试范围为 $90\sim 120\text{mA}$ 。在不同温度设定值下,电流在 $90\sim 120\text{mA}$ 之间变化时,激光器中心波长与控制电流呈线性正相关,其表达式分别为

$$\lambda = \begin{cases} 0.00015I + 1550.12087, & (90 \leq I \leq 120, T = 29.5) \\ 0.00013I + 1550.12958, & (90 \leq I \leq 120, T = 30) \\ 0.00011I + 1550.13794, & (90 \leq I \leq 120, T = 30.5) \\ 0.00009I + 1550.14617, & (90 \leq I \leq 120, T = 31) \\ 0.00008I + 1550.15417, & (90 \leq I \leq 120, T = 31.5) \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可见,激光器控制电流与中心波长线性表达式的斜率随着温度的升高而逐渐减小,分别为 $0.15\text{pm}/\text{mA}$ 、 $0.13\text{pm}/\text{mA}$ 、 $0.11\text{pm}/\text{mA}$ 、 $0.09\text{pm}/\text{mA}$ 、 $0.08\text{pm}/\text{mA}$ 。因此,可通过控制电流的大小实现激光器中心波长精细化的控制。

将温度设定在 0.5°C 为步长 $25^{\circ}\text{C}\sim 27^{\circ}\text{C}$ 范围

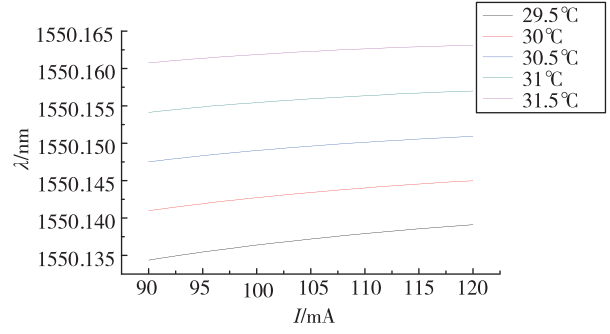


图 8 激光器一的 I - λ 关系示意图

Fig. 8 I - λ relationship of laser I

内,激光器二 I - λ 关系如图 9 所示,与激光器一有类似变化趋势。电流在 $100\sim 120\text{mA}$ 变化时,不同设定温度下,中心波长与电流表达式为

$$\lambda = \begin{cases} 0.00022I + 1550.10880, & (100 \leq I \leq 120, T = 25) \\ 0.00021I + 1550.11711, & (100 \leq I \leq 120, T = 25.5) \\ 0.00020I + 1550.12510, & (100 \leq I \leq 120, T = 26) \\ 0.00019I + 1550.13299, & (100 \leq I \leq 120, T = 26.5) \\ 0.00018I + 1550.14021, & (100 \leq I \leq 120, T = 27) \end{cases} \quad (13)$$

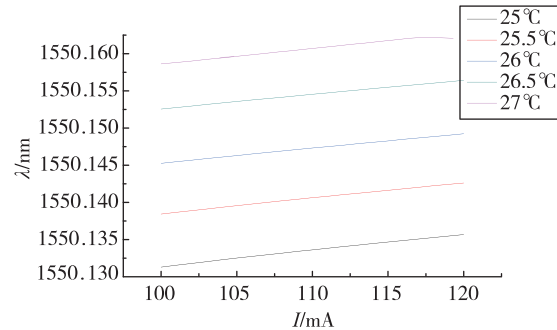


图 9 激光器二的 I - λ 关系示意图

Fig. 9 I - λ relationship of laser II

(4) 半导体激光器 T - λ 特性

将激光器一电流以 0.5mA 为步长设定在 $109\sim 111\text{mA}$,得激光器中心波长随温度变化 T - λ 关系如图 10 所示。总体上,升温时激光器中心波长先是随着温度的升高而近似线性变大,当温度升高到某一值时中心波长出现突然减小的拐点,然后随着温度的升高而增大;降温时激光器中心波长先是随着温度的降低而近似线性减小,当温度降低到某一值时中心波长出现突然增大的拐点,然后随着温度的降低而继续减小。以驱动电流为 110mA 进行分析,升温阶段及降温阶段中心波长与温度之间的表达式为:

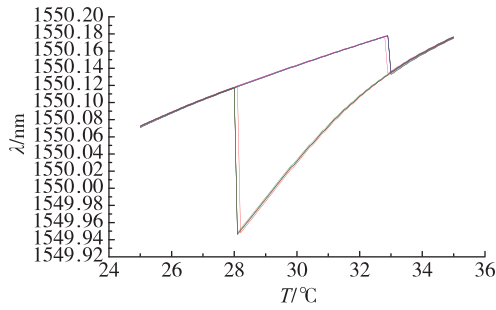


图 10 激光器一的 T-λ 关系示意图

Fig. 10 T-λ relationship schematic of laser I

$$\lambda_{升} = \begin{cases} 0.01331T + 1549.74289, & 25 \leq T \leq 32.9 \\ 0.02054T + 1549.45824, & 33 \leq T \leq 35 \end{cases} \quad (14)$$

$$\lambda_{降} = \begin{cases} 0.01503T + 1549.69783, & 25 \leq T \leq 28 \\ 0.03367T + 1549.01840, & 28.1 \leq T \leq 35 \end{cases} \quad (15)$$

由式(14)、式(15)可知,升降温曲线各自的不同阶段,温度对中心波长有不同程度的影响。根据 R-FOG 工作原理,激光器中心波长匹配是实现拍频检测的关键指标,为避免中心波长大范围的波动,应避免激光器进入降温曲线。不同电流设定值下,温度在 28.1°C ~ 32.9°C 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式(16)

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda &= 0.01338T + 1549.74058, (28.1 \leq T \leq 32.9, I = 109) \\ \lambda &= 0.01335T + 1549.74040, (28.1 \leq T \leq 32.9, I = 109.5) \\ \lambda &= 0.01331T + 1549.74289, (28.1 \leq T \leq 32.9, I = 110) \\ \lambda &= 0.01329T + 1549.74417, (28.1 \leq T \leq 32.9, I = 110.5) \\ \lambda &= 0.01324T + 1549.74558, (28.1 \leq T \leq 32.9, I = 111) \end{aligned} \right. \quad (16)$$

由式(16)可知不同曲线常数部分为 1549.74308nm (±2.50pm),斜率为 0.01331nm(±0.07pm),即温度每升高 1°C 激光器中心波长变化 13.31pm(±0.07pm),且斜率随着电流的增大而减小。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的粗调。

将激光器二驱动电流设定在 0.5mA 为步长的 112~114mA 范围内,测得激光器中心波长随温度变化的 T-λ 关系如图 11 所示,与激光器一有类似的变化趋势。温度在 23°C ~ 29°C 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式(17),同样可实现中心波长的粗调。

$$\left\{ \begin{aligned} \lambda &= 0.01363T + 1549.79303, (23 \leq T \leq 29, I = 112) \\ \lambda &= 0.01360T + 1549.79408, (23 \leq T \leq 29, I = 112.5) \\ \lambda &= 0.01351T + 1549.79662, (23 \leq T \leq 29, I = 113) \\ \lambda &= 0.01367T + 1549.79061, (23 \leq T \leq 29, I = 113.5) \\ \lambda &= 0.01366T + 1549.79158, (23 \leq T \leq 29, I = 114) \end{aligned} \right. \quad (17)$$

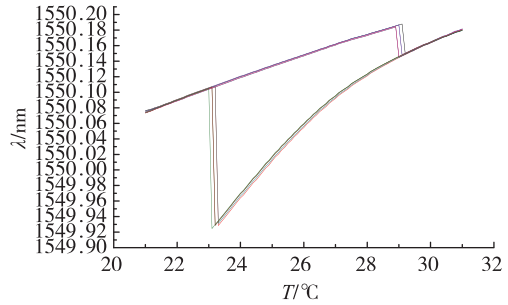


图 11 激光器二 T-λ 关系示意图

Fig. 11 T-λ relationship schematic of laser II

3.2 工作区域确立

激光器最佳工作点处光功率/中心波长随电流温度的变化关系如表 1 所示。R-FOG 通过检测 2 个激光器之间拍频来测量旋转角速度,首先要求 2 个激光器中心波长差控制在 ±4.10pm 内,最佳工作点处激光器一与二之间中心波长的差值为 2.23pm,当激光器一温度在 (30.5 ± 0.22)°C 变化且激光器二的温度在 (26 ± 0.22)°C 变化时,两激光器中心波长的变化范围为 ±2.99pm,处于中心波长差要求的变化范围之内;当激光器一的电流在 (110 ± 27.1) mA 变化且激光器二的电流在 (113 ± 14.9) mA 变化时,两激光器中心波长的变化范围为 ±2.99pm,处于中心波长差要求的变化范围之内。其次要求 2 个激光器光功率量级一致,激光器本身功率差别较大,可通过可调衰减器的损耗实现光功率的一致。此外,激光器一与二的电流最大值分别为 130mA 和 125mA,电流工作

表 1 激光器光功率/中心波长分析

Tab. 1 Laser light power/center wavelength analysis

	激光器一	激光器二
电流温度最佳工作点	(110mA, 30.5°C)	(113mA 26°C)
最佳工作点处中心波长/nm	1550.15013	1550.14790
最佳工作点处的光功率/mW	11.391	9.135
光功率随电流变化率/mW	0.18	0.17
光功率随温度变化率/dBm	0.25	0.39
中心波长随电流变化率/pm	0.11	0.20
中心波长随温度变化率/pm	13.31	13.31

点距离最大值需要预留 5~10mA 的裕量。由此可知,激光器一温度最优工作区域为 $(30.5 \pm 0.22)^\circ\text{C}$, 电流最优工作区域为 $(110 \pm 10)\text{mA}$; 激光器二的温度最优工作区域为 $(26 \pm 0.22)^\circ\text{C}$, 电流最优工作区域为 $(113 \pm 5)\text{mA}$ 。

4 结论

本文通过对外腔半导体激光器性能指标详实的测量得到如下结论:

1) 设计了谐振式光纤陀螺用外腔半导体激光器最佳工作点及最优工作区间的确立方法。

2) 据此方法分析可得本文激光器详细性能参数为:

① 当激光器一电流在 90~120mA, 温度在 $28.1 \sim 32.9^\circ\text{C}$ 的范围内变化时, 光功率/中心波长与温度电流近似呈线性正相关; 激光器二有相应线性正相关的电流与温度的变化范围。

② 两激光器最佳电流工作点为 110mA 和 113mA, 温度最佳工作点为 30.5°C 和 26°C 。

③ R-FOG 进行拍频检测时, 激光器一与二的最优工作区域为: 激光器一的温度最优工作区域为 $(30.5 \pm 0.22)^\circ\text{C}$, 电流最优工作区域为 $(110 \pm 10)\text{mA}$; 激光器二的温度最优工作区域为 $(26 \pm 0.22)^\circ\text{C}$, 电流最优工作区域为 $(113 \pm 5)\text{mA}$ 。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 李强. 谐振式光纤陀螺小型化技术研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2015.
- [3] 王巍. 新型惯性技术发展及在宇航领域的应用[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 1-6.
- [4] 马迎建, 宋彭, 武学英. 外腔半导体激光器在谐振式光纤陀螺中的应用研究[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(4): 51-54.
- [5] Quintero-Quiroz C, Tiana-Alsina J, Romà J, et al. Quantitative identification of dynamical transitions in a semiconductor laser with optical feedback[J]. Scientific Reports, 2016(6): 37510.
- [6] Koeth J, Nähle L. Semiconductor laser and method for producing a semiconductor laser comprising a feedback element: U. S. Patent 9397480 [P]. 2016-07-19.
- [7] Jornod N, Brochard P, Wittwer V, et al. First investigation of the noise and modulation properties of the carrier envelope offset frequency in a semiconductor modelocked laser[C]//CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 2016: SM3I. 4.
- [8] Du Y, Fu Y, Zheng L. Complex amplitude reconstruction for dynamic beam quality M^2 factor measurement with self-referencing interferometer wavefront sensor[J]. Applied Optics, 2016, 55(36): 10180-10186.
- [9] Ge L, Feng L. Contrasting eigenvalue and singular-value spectra for lasing and antilasing in a PT-symmetric periodic structure [J]. Physical Review A, 2017, 95(1): 013813.
- [10] 曹翔科, 何耀, 张蓉竹. 两种不同类型独立激光器的拍频实验[J]. 中国激光, 2006, 36(2): 286-287.