

# 半导体激光器波长温度特性的建模与试验研究

辛倩倩, 万熠, 毕文波, 张平清

山东大学

**摘要:** 在半导体激光器的干涉测量中, 半导体激光器作为系统的光源, 其波长稳定性会影响测量系统的性能。为了定量地研究温度对半导体激光器波长的影响规律, 首先, 从激光器的内部机理出发推导激光器波长随温度变化的模型表达式, 并通过 MATLAB 对模型进行仿真; 然后, 对不同温度下的激光波长进行试验测量; 最后, 通过仿真与试验数据验证了模型的有效性, 并得出激光器波长随温度升高而变长、变化规律近似为线性的结论。

**关键词:** 半导体激光器; 波长温度特性; 数值模型; 试验研究

中图分类号: TG88; TH741; TN248.4

文献标志码: A

## Study on Modeling and Experiment of Wavelength Temperature Characteristic for Semiconductor Laser

Xin Qianqian, Wan Yi, Bi Wenbo, Zhang Pingqing

**Abstract:** The semiconductor laser affects the measurement performance due to its temperature characteristic, when it is used as light source of self-mixing interference measurement system based on semiconductor laser. In order to study the influence rule of temperature for semiconductor laser, model of laser wavelength changing with temperature based on the internal mechanism of semiconductor laser is established, and the model is simulated by MATLAB. Then the experiment measurement for laser wavelength under different temperature is carried out to verify the effectiveness of the model. Finally, the simulation and experiment results show that laser wavelength become longer with the increase of temperature, and the relation between them is similar to linear.

**Keywords:** semiconductor laser; temperature characteristic; numerical model; experiment study

## 1 引言

半导体激光器的干涉测量技术因其精度高、非接触的特点, 在位移、振动测量等方面得到广泛应用<sup>[1-5]</sup>。半导体激光器作为干涉系统的光源, 因其耗能属性, 在工作过程中不断产生热量, 造成激光器温度明显升高。因温度升高造成的激光器输出波长的变化<sup>[6,7]</sup>, 对干涉测量系统的测量精度有较大影响。

研究者们就温度变化对激光器性能的影响规律进行了深入分析<sup>[8-12]</sup>。Yize Huang 等<sup>[10]</sup>利用外腔反馈速率方程建立了激光波长—温度数值模型, 但该模型中仅包含波长的变化率参数, 无法与激光器内部参数相联系; 马详柱等<sup>[11]</sup>从理论上分析了产生红移的原因: 禁带宽度、谐振腔折射率和谐振腔尺寸受到温度影响变化, 进而改变输出波长, 但其没有得到准确描述这一变化的模型; 陈苗等<sup>[12]</sup>利用等效电路模型模拟了温度变化对激光器频率响应的影响, 并得出结论: 温度升高, 激光器输出中心频率减小, 但对频率随温度的变化规律并没有进行数值化的描

述。上述研究虽然对激光器的温度特性进行了研究, 但没有建立准确描述波长随温度变化的数学模型, 不便于从理论角度分析激光器温度特性对整个测量系统性能的影响。

为了分析温度变化对激光器波长特性的影响, 本文基于激光器的内部机理, 推导出激光器的波长随温度变化的数值模型, 同时利用 MATLAB 对模型进行仿真, 并进行了试验测量, 将试验结果与理论分析结果相对比, 验证了理论模型的正确性。

## 2 激光器的波长温度特性模型

### 2.1 温度对激射波长的影响

由激光震荡条件可知, 具有某一能量的光子束, 当其获得的增益正好抵消传播过程中的损耗时, 就会形成具有一定频率的光波向外输出。对有源区材料的增益研究表明, 带边的增益是最大的, 即能量等于导带和价带之间带隙能量的光子形成的光波, 可以形成稳定的驻波。温度的升高会引起能带的展宽, 导致导带低能级下降, 而价带顶能级升高, 两能带之间的带隙减小, 跃迁产生的光子能量变小, 光波长变长, 产生红移。

带边跃迁产生的光子能量<sup>[13,14]</sup>为

$$hv = E_g \quad (1)$$

式中,  $E_g$  是带隙能量;  $h$  是普朗克常量;  $v$  是光频率。由此获得的激射波长为

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad (2)$$

式中,  $c$  是光速。由于  $E_g$  是温度的函数, 其随温度的变化规律近似为线性

$$E_g = -b_e(T - T_0) + E_{g0} \quad (3)$$

式中,  $b_e$  取值由有源区材料决定;  $T_0$  是激光器的理想工作温度;  $E_{g0}$  是温度为  $T_0$  时的带隙能量, 它可以由此时的激光波长计算公式  $E_{g0} = hc/\lambda_0$  得到, 其中  $\lambda_0$  是温度为  $T_0$  时的激光波长。

将式(3)代入式(2), 并将式(2)两边对温度求导, 整理得到激射波长随温度变化的表达式为

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{1 - \frac{b_e(T - T_0)\lambda_0}{hc}} \quad (4)$$

## 2.2 温度对激光选择模式的影响

温度变化除了影响带隙能量外, 对激光器材料的折射率和谐振腔长度也会产生影响。已知由折射率和腔长决定的激光模式选择公式<sup>[15]</sup>为

$$\lambda = 2nd/M \quad (5)$$

式中,  $n$  是激光器材料的有效折射率;  $d$  是谐振腔长;  $M$  是模数。

由于热胀冷缩现象, 温度变化引起腔长的变化, 变化规律可表示为

$$d = d_0[1 + \alpha(T - T_0)] = d(T) \quad (6)$$

式中,  $d_0$  是温度为  $T_0$  时的腔长;  $\alpha$  是材料的热膨胀系数。

材料的折射率也会随温度的变化而改变, 变化规律为

$$n = n_0 + k(T - T_0) = n(T) \quad (7)$$

式中,  $n_0$  是温度为  $T_0$  时的折射率,  $k$  是折射率变化的温度系数。

将式(6)和式(7)代入式(5)中, 并将式(5)两端对温度求导, 整理得到激光器选择模式随温度的变化规律可表示为

$$\lambda(T) = \frac{2kad_0}{M}(T - T_0)^2 + \left(\frac{2kd_0}{M} + \frac{2ad_0n_0}{M}\right)(T - T_0) + \lambda_0 \quad (8)$$

## 2.3 波长随温度变化模型表达式

综合考虑温度对激射波长和激光模式的影响, 最终导致激光器输出波长的变化, 激光波长随温度变化规律可表示为

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{1 - \frac{b_e(T - T_0)\lambda_0}{hc}} + \frac{2kad_0}{M}(T - T_0)^2 + \left(\frac{2kd_0}{M} + \frac{2ad_0n_0}{M}\right)(T - T_0) \quad (9)$$

对式(9)展开, 去掉系数较小的项, 化简后得到激光波长随温度变化规律

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_0\left(\frac{\lambda_0 b_e}{hc} + \frac{k}{n_0} + \alpha\right)(T - T_0) \quad (10)$$

## 2.4 波长随温度变化模型仿真

利用 MATLAB 对式(10)所示模型进行仿真, 取仿真条件: 有源区材料为 GaAs 的 F-P 腔激光器, 理想工作温度为 25℃, 此时中心波长为 808nm, 谐振腔长 1000μm,  $b_e$  数值为  $4.7 \times 10^{-4}$  eV/K, 仿真结果如图 1 所示。分析图 1 可知, 激光波长随温度升高而变长, 且变化规律近似为线性。

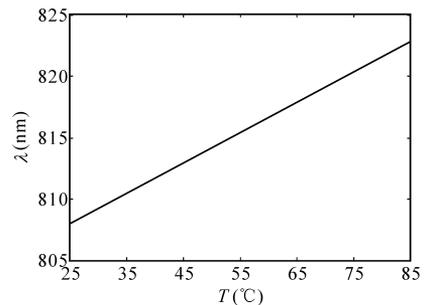


图 1 波长随温度变化的仿真曲线

## 3 试验验证

基于上述理论分析进行试验验证, 试验设备如图 2 所示。试验所用光谱仪型号为 HR2000+, 光学分辨率为 0.035 - 6.8nm。激光器驱动电源型号为 LDC-3744C, 带有温度控制模块, 所用光源为波长 808nm 的半导体激光器。

如图 2 所示, 激光器发出的光经过右侧的白板反射后进入光谱仪的光纤中, 上位机中安装有与光谱仪配套的软件, 可以获得所测激光的波长。激光驱动电源的温度控制模块用于提供试验所需的不同温度。

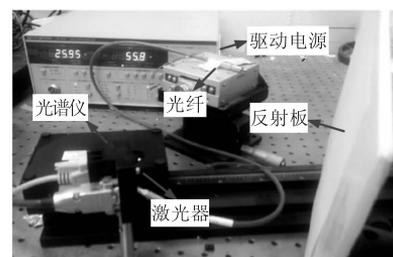


图 2 试验装置

试验所用激光器的理想工作温度是 25℃, 试验

过程中通过设置激光驱动电源的参数,改变激光器的工作温度,在不同温度下测得的激光波长如表 1 所示。

表 1 不同温度时激光波长测量值

第一次		第二次		第三次	
温度(°C)	波长(nm)	温度(°C)	波长(nm)	温度(°C)	波长(nm)
25	807.8	25	807.7	25	807.8
35	810.4	35	810.3	35	810.3
45	813.3	45	813.2	45	813.2
55	815.7	55	815.8	55	815.8
65	818.1	65	818.2	65	818.1
75	820.5	75	820.6	75	820.6
85	823.1	85	823.2	85	823.1

将 3 次测量结果取平均值,绘制波长随温度变化的曲线如图 3 所示。

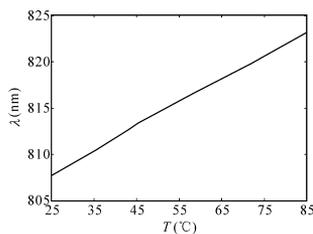


图 3 不同温度下的激光波长曲线

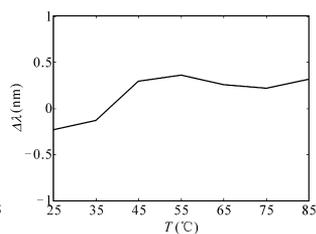


图 4 试验结果与仿真结果比较

分析图 3 可知,随着温度的升高,激光波长变长,且变化规律近似为线性。该试验结果与理论分析结果一致,验证了式(5)所示理论模型的正确性。试验结果与仿真结果的误差如图 4 所示。分析图 4 可知,理论仿真结果与试验结果的误差较小,因此证明理论模型的准确性。

## 4 结语

本文从半导体激光器的工作机理出发,分析温度变化对激光器材料的能带大小、材料折射率、激光器谐振腔长以及增益特性等的影响规律,推导得到激光波长随温度变化的数值模型,并通过 MATLAB 对模型进行仿真,得到激光器波长随温度变化的直观图像。

在理论分析的基础上,对不同温度下激光器的波长进行了试验测量。对测量数据进行分析,得出结论:激光器波长随温度升高而变长,变化规律近似为线性。通过对比试验结果与仿真分析结果,证明了所建立模型的有效性。在今后的研究中,可以将此模型应用到干涉测量系统中,在测量精度要求较高、激光器温度变化较大的场合,利用该模型对激光器进行温度补偿可以减小温度变化对测量结果造成

的误差。

## 参考文献

- [1] Xi J T, Yu Y G, Chicharo J F, et al. Estimating the parameters of semiconductor lasers based on weak optical feedback self-mixing interferometry [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2005, 41(8): 1058-1064.
- [2] Bosch T. An overview of self-mixing sensing applications [C]. Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices, 2004 Conference on. 2004; 385-392.
- [3] Ottonelli S, Dabbicco M, De Lucia F, et al. Laser self-mixing interferometry for mechatronics applications [J]. Sensors, 2009, 9(5): 3527-3548.
- [4] 姜一民. 激光干涉仪的应用——激光干涉仪技术综述之五[J]. 工具技术, 2015, 48(2): 79-85.
- [5] 王淑珍, 谢铁邦. 基于激光干涉的接触式微位移测量仪[J]. 工具技术, 2010, 44(1): 105-108.
- [6] 单成玉. 温度对半导体激光器性能参数的影响[J]. 林师大学学报(自然科学版), 2003, 24(4): 95-97.
- [7] 汪瑜. 半导体激光器热特性分析研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2009.
- [8] 韦文生. 980nm 半导体激光二极管的温度特性[J]. 激光与红外, 2006, 36(7): 558-560.
- [9] White J K, Evans J, Spring Thorpe A J. Temperature performance of AlGaInAs semiconductor lasers [J]. Lasers and Electro-Optics Society, 2001, 2: 806-807.
- [10] Huang Y Z, Li Y, Wang H F, et al. Wavelength stabilization of a 980nm semiconductor laser module stabilized with high-power uncooled dual FBG [J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(3): 57-61.
- [11] 马祥柱, 霍晋, 曲轶, 等. 808nm 半导体激光器的温度特性[J]. 激光与红外, 2010, 40(12): 1306-1309.
- [12] 陈苗, 陈福深, 肖勇. 温度对半导体激光器特性的影响[J]. 中国科技信息, 2011(3): 46-47.
- [13] 拉里·A·科尔德伦, 著. 二极管激光器与集成光路[M]. 史寒星, 译. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006.
- [14] 江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [15] 蔡伯荣, 陈铮, 刘旭. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版社, 1995.

第一作者: 辛倩倩, 工程实验教师, 山东大学机械工程学院, 高效洁净机械制造教育部重点实验室, 250061 济南市

First Author: Xin Qianqian, Teacher of Engineering Experiment, Key Laboratory of High-efficiency and Clean Mechanical Manufacture, College of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China