

文章编号 1004-924X(2011)06-1244-06

准连续输出大功率半导体激光器的结温测试

田振华^{1,2}, 孙成林⁴, 曹军胜¹, 郜峰利³, 宁永强¹, 王立军^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049; 3. 吉林大学 电子科学与工程学院, 吉林 长春 130023;

4. 吉林大学 物理学院, 吉林 长春 130023)

摘要:基于大功率半导体激光器的热传导模型提出了一种测量准连续输出大功率半导体激光器结温的方法。实验通过测量 980 nm 大功率半导体激光器在不同电脉冲宽度(5~200 μ s)下的时域光谱和输出特性 $d\lambda/dT=0.3$ nm/ $^{\circ}$ C 来确定它的结温;同时,根据热传导模型推导出准连续工作条件下结温的近似解析表达式来验证测量得到激光器的结温。结果表明,实验测量结果和通过解析表达式理论计算结果之间符合得很好。所提出的解析表达式可准确预测大功率半导体激光器在准连续工作条件下的结温而无需测量时域光谱,是一种简便快速的预测方法。

关键词:半导体激光器;结温测试

中图分类号:TN 248.4 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111906.1244

Junction temperature measurement of high power diode lasers

TIAN Zhen-hua^{1,2}, SUN Cheng-lin⁴, CAO Jun-sheng¹,
GAO Feng-li³, NING Yong-qiang², WANG Li-jun^{2*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;*

3. *Institute of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130023, China;*

4. *Institute of Physics, Jilin University, Changchun 130023, China)*

* *Corresponding author, E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn*

Abstract: A measuring method for the junction temperature of Quasi-Continuous Wave (QCW) and high power semiconductor laser diodes was put forward based on the thermal model of a high power semiconductor laser. In experiments, the different spectra and output powers of a 980 nm high power semiconductor laser diode under different pulse widths (5~200 μ s) were measured and the junction temperature was obtained by the relationship of $d\lambda/dT=0.3$ nm/ $^{\circ}$ C. Furthermore, an approximate analytical equation was deduced on the basis of the thermal model to calculate the junction temperature. The experiment shows that the measured results are in a good agreement with the analytical results. In conclusion, the equation is a convenient method for predicting the junction temperature without meas-

收稿日期:2010-03-16;修订日期:2010-06-28.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(No. 90923037);吉林大学科学前沿与交叉学科创新项目(No. 200903089)

uring the spectrum.

Key words: semiconductor laser; junction temperature measurement

1 引言

半导体激光器由于其光电转换效率,输出功率和使用寿命等方面的优势取代闪光灯泵浦固体激光的趋势已初见端倪,这不仅仅是技术上的进步,更重要的是它还将带来巨大的经济效益。此外,大功率半导体激光器也可以直接应用于激光加工、激光显示、激光医疗和军事应用等领域。半导体激光器的输出特性与其有源区的工作温度(结温)密切相关,如果结温升高,激光器的效率会下降、阈值电流增加、波长红移、增加内部缺陷,严重影响激光器的寿命。因此,如何减少热量的产生和加快热量的耗散就显得十分重要。为了降低激光器的温升,需要通过实验的方法对大功率半导体激光器的结温进行测试,并结合简单快速的理论分析来验证和预测激光器有源区的温度。

目前,常用的测量有源区温度的方法有阈值电流法^[1]、热阻法^[2]、热像反射显微镜法^[3]、电致发光^[4]、光致发光^[5]或非接触法^[6]等,此外,微拉曼光谱法可用来测量激光器的腔面温度和温度分布^[7],但这些方法中有的需要完整地设计一套测试系统,有的则是需要用到一些昂贵的测试仪器。目前也有人提出用电压法测量结温^[8-9],但是并不适合于大功率半导体激光器。本文提出了一种测量和计算半导体激光器有源区温度的方法,即测量其在不同脉宽条件下的光谱和输出功率,通过波长的漂移量来计算激光器的温度,然后采用一种解析方法计算不同脉宽条件下的有源区温度。与实验测试的有源区温度进行对比,可知试验结果与解析算法符合得很好。

2 理论模型

图1所示为一种直连结构的大功率半导体激光器,P面朝下直接焊接在制冷热沉上,同时激光器的前腔面与热沉边缘对齐,在保证输出光束传播路径不受热沉阻挡的情况下热接触面积最大

化。这种结构的半导体激光器有源区热量能够通过最短的路径,最大的传输面积传递到热沉中,因此封装热阻很小,适合于高占空比器件和连续器件。图2所示为直连结构大功率半导体激光器的导热模型示意图,激光器的腔长为1 mm,厚度为120 μm,激光器的长度为10 mm。

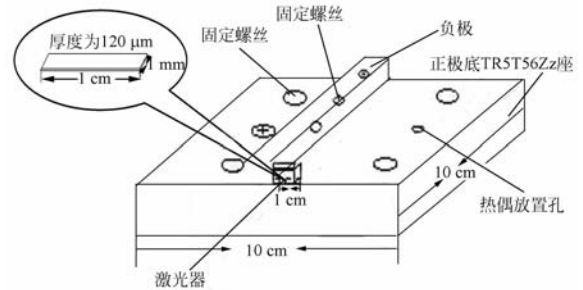


图1 半导体激光器直连结构示意图

Fig. 1 Connecting structure for laser diode and heatsink

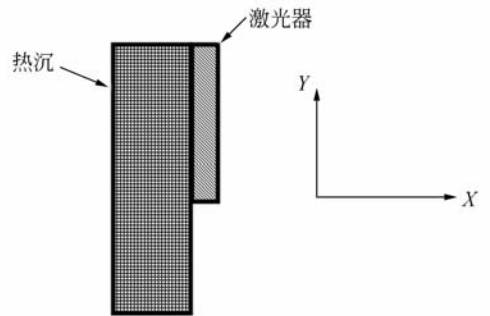


图2 直连结构导热模型

Fig. 2 Connecting structure of thermal model

由于激光器的热量是来自中间1~2 μm厚的有源区,可以假设热量不能通过激光器的侧向、末端或者顶面进行散热,因此在计算中假设热量是产生在热沉/GaAs界面。对于准连续输出大功率半导体激光器,有源区的热量沿着垂直方向进入GaAs衬底和热沉材料的,计算中可以只考虑一维方向的热流。

半导体激光器/热沉界面的热流量 Φ 可以表示为

$$\Phi = (1 - \eta) \frac{P_{\text{opt}}}{A\eta}, \quad (1)$$

其中 η, P_{opt}, A 为转换效率、光输出功率和激光器的面积;面积 $A=l_{cav} l_{bar}$,其中 l_{cav} 为腔长, l_{bar} 为激光条的长度。

在图 2 所示的导热模型中,热导微分方程为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} \quad (2)$$

边界条件为

$$\begin{cases} T(t=0) = T_0 \\ -K \frac{\partial T}{\partial X}(x=0) = \Phi \end{cases} \quad (3)$$

其中, T 为温度, t 为时间, K 是热导率, κ 是热扩散率,且 κ 可由下式确定:

$$\kappa = \frac{K}{\rho C_p} \quad (4)$$

其中 ρ 为材料的密度, C_p 为定压比热容。

由方程(2)可以看出导热热流量 Φ 与温度变化率有关,所以研究导热的核心就是计算物体的温度分布。当热沉尺寸 \geq 激光器芯片(bar)尺寸 100 倍时,可近似等效为无限大的散热平面。

对于一维半无限大平面,联合方程(1)-(4),方程(2)的解为:

$$T(x,t) = \frac{1-\eta}{\eta} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\kappa t}}\right) \operatorname{erfc}\left[\left(\frac{P_{opt}}{KA}\right)\sqrt{\kappa t}\right] \quad (5)$$

对于 $x=0$,即在热沉/GaAs 界面处,方程(5)的解为:

$$T(x=0,t) = \frac{1-\eta}{\eta} \operatorname{erfc}\left[\left(\frac{P_{opt}}{KA}\right)\sqrt{\kappa t}\right] \quad (6)$$

根据余误差函数的近似公式,方程(6)可以简化为

$$T(x=0,t) = \frac{2(1-\eta)P_{opt}}{\eta KA} \frac{\sqrt{\kappa t}}{\sqrt{\pi}} = \frac{2(1-\eta)P_{opt}}{\eta A} \sqrt{\frac{t}{\pi K \rho C_p}} \quad (7)$$

由公式(7)可以看出,半导体激光器瞬态结温与时间的平方根成正比,与激光器的面积 A 成反比,与激光器的结构参数 $(K\rho C_p)^{1/2}$ 成反比。公式(7)描述的是热量流进一个半无限大材料的情况,在半导体激光器中,大部分热量流入热沉,而一些热量也将流进激光器。为了计算这部分热量,可对公式(7)进行修正,即为:

$$\frac{\sqrt{\kappa}}{K} = \frac{\sqrt{\kappa_{hs} \kappa_{GaAs}}}{K_{hs} \kappa_{GaAs}^{1/2} + K_{GaAs} \kappa_{hs}^{1/2}} \quad (8)$$

其中下标 hs 代表热沉,下标 $GaAs$ 代表 $GaAs$ 激光器。

3 实验测试及结果

为了测量激光器在工作时的结温,测量装置如图 3 所示。激光器被固定在 TEC 制冷器上,热沉温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$;激光器由脉冲驱动电源驱动,在准连续条件下工作($200\text{ }\mu\text{s}, 100\text{ Hz}$),工作电流为 75 A 。由探测器和综合参数测试仪测试激光器的输出特性,计算机控制输出特性的测试。

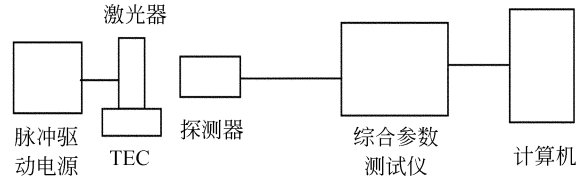


图 3 激光器结温测试装置图

Fig. 3 Measurement set-up for junction temperature of diode lasers

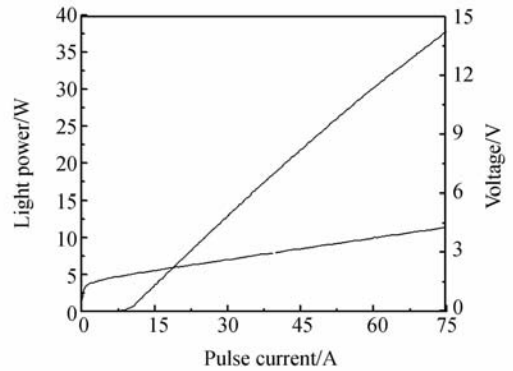


图 4 激光器 $P-I-V$ 曲线

Fig. 4 Curve of $P-I-V$

实验中所用的大功率半导体激光器为 MOCVD 方法生长的 $GaAsP/GaInP/GaAs$ 量子阱激光器,其激射波长为 808 nm ,条宽为 $150\text{ }\mu\text{m}$,腔长为 1 mm 。图 4 是其 $P-I-V$ 曲线,激光器在 75 A 脉冲工作电流下的输出功率为 38 W ,工作电压为 4.3 V ,斜率效率为 0.59 W/A 。图 5 是采用结温测量装置测试的激光器在一定电流下的时域光谱。从图 5 中可出,随着工作时间的增加,

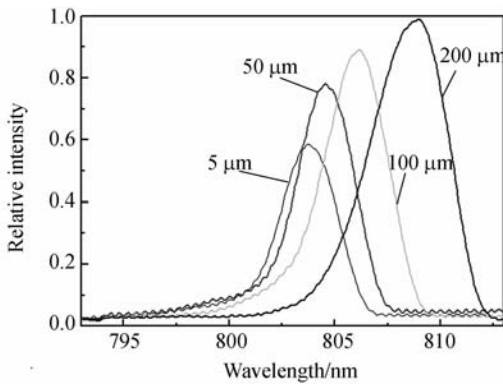


图 5 激光器在一定电流下的时域光谱
Fig. 5 Time domain spectra of diode laser

激光器的激光波长移向长波,这是由于 GaAsP 有源区带间距的减少引起的。

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha\theta}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{2T}{\theta}\right)^p} - 1 \right]. \quad (9)$$

对此公式在 MATLAB 平台上做了模拟, T 取值为 300~400 K,可以得出波长与温度近似呈线性关系 $d\lambda/dT=0.3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 的结论,如图 6。

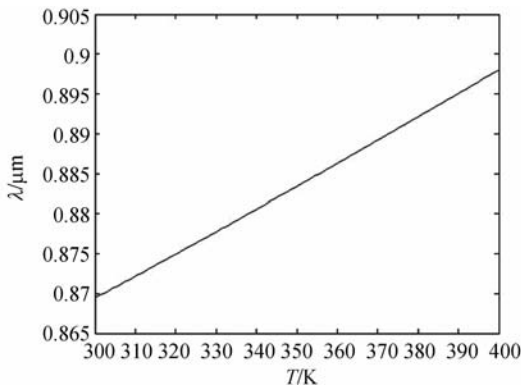


图 6 激光波长随温度变化关系图
Fig. 6 Dependence of wavelength on temperature

激光器的结温变化可以近似通过激光波长随温度的漂移量来计算,即 $\frac{d\lambda}{dT}=0.3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。由图 5 和波长-温度的依赖关系,激光器的结温随时间的变化关系见图 7。图 7 也给出了根据公式(7)理论模拟的激光器的结温随时间的变化(计算中所用参数见表 1),从中可以看出实验测试结果与理论计算结果之间符合得很好;说明所采用的解析表达式可以准确地预测激光器的结温随工作时间的变化。

实验中测试了 4 个不同的激光器样品,腔长均为 1 mm,每个激光器均包含 19 个发光单元,每个发光单元的条宽为 150 μm,激光器的输出功率为 40 W。图 8 给出了另外 4 个样品在 75 A 电流和相同的准连续工作条件下的结温随时间的变化。图中给出了每个激光器的实验测试结果和采用公式(7)的计算结果;图 8 中的符号代表 4 个样品的试验测量结果,而曲线代表每个激光器的模拟结果。从中可以发现,实验结果和理论结果符合得很好;4 个样品的结温的差异,主要是由激光器的转化效率和输出功率的大小造成。

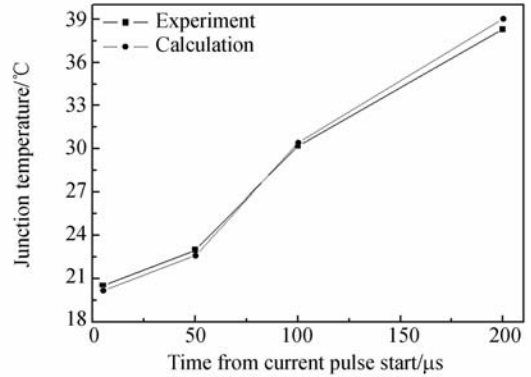


图 7 激光器结温与电脉冲注入时间的关系
Fig. 7 Junction temperature vs. function time

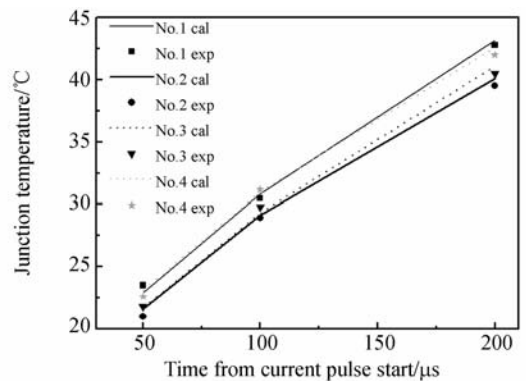


图 8 4 个激光器的结温随电注入时间的变化
Fig. 8 Junction temperatures of four diode lasers vs. time

表 1 激光器参数

Tab. 1 Parameters of diode laser in calculation

	K	ρ	C_p	κ
	$/(W \cdot cm^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	$/(g \cdot cm^{-3})$	$/(J \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	$/(cm^2 \cdot s^{-1})$
copper	4.0	8.96	0.39	1.14
GaAs	0.54	5.32	0.35	0.29

4 结 论

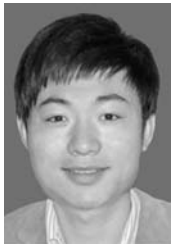
本文对半导体激光器在不同脉宽工作条件下的光谱和输出特性进行了实验测量,并结合实验测量的波长漂移量来确定激光器的结温;同时提

出一种解析方法计算了不同脉宽条件下的有源区温度(结温)。与实验测试的有源区温度进行对比,结果显示,试验结果与解析算法符合得很好。表明提出的理论方法可很好地验证和预测激光器的有源区温度。

参考文献:

- [1] ABDELKADER H I, HAUSIEN H H, MARTIN J D. Temperature rise and thermal rise-time measurements of a semiconductor laser diode [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992, 63(3):2004-2007.
- [2] SETSUKO M, HIROSHI N. Adding a heat bypass improves the thermal characteristics of a 50 μm spaced 8-beam laser diode array [J]. *J. Appl. Phys.*, 1992, 72(6): 2514-2516.
- [3] EPPERLEIN P W. Mapping of local temperatures on mirrors of GaAs/AlGaAs laser diodes [C]. *Proceedings of 17th International Symposium of Gallium Arsenide and Related Compounds, IOP Conference Series*, 1990, 633:112.
- [4] EPPERLEIN P W, BONA G L. Influence of the vertical structure on the mirror facet temperature of visible GaInP quantum well laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, 62(24):3074-3076.
- [5] HALL D C, GOLDBERG L, MEHUYS D. Technique for lateral temperature profiling in optoelectronic devices using a photoluminescence microprobe [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, 61(4):384-386.
- [6] GU Y M, NADARAJAH N. A non-contact method for determining junction temperature of phosphor-converted white LEDs [J]. *SPIE*, 2004, 5187: 107-114.
- [7] SATORU T. Temperature distribution along the striped active region in high-power GaAlAs visible lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1985, 58(3):1124-1128.
- [8] RYU H Y, HA K H, CHAE J H, *et al.*. Measurement of junction temperature in GaN-based laser diodes using voltage-temperature characteristics [J]. *SPIE*, 2005, 5738:238-244.
- [9] FRIEDRICH B. Present technology, industrial applications and future prospects of high power diode lasers[J]. *SPIE*, 2002, 4762:1-15.
- [10] 顾媛媛,冯广智,单肖楠,等. 808nm 和 980nm 半导体激光选阵波长耦合技术光学[J]. *精密工程*, 2009, 17(1), 8-13.
GU Y Y, FENG G ZH, SHAN X N, *et al.*. 808 nm and 980 nm high power laser diode stack with wavelength coupling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1), 8-13.
- [11] JOACHIM PIPREK. *Semiconductor Optoelectronic Device*[M]. Elsevier Science, 2003:21-23.

作者简介:



田振华(1984—),男,江苏南通人,博士研究生,主要从事大功率半导体激光器的研究。E-mail: greathailang@163.com



曹军胜(1978—),男,陕西延川人,博士,副研究员,主要从事半导体激光器应用的研究。E-mail: caojs@jlu.edu.cn



郜峰利(1977—),男,河南沁阳人,博士,讲师,主要从事专业电路与系统、微弱信号检测与处理、功能光学成像等方面的研究。E-mail: gaofl@jlu.edu.cn



宁永强(1965—),男,吉林长春人,博士,研究员,博士生导师,长期从事半导体激光器、光电探测器材料生长和器件的研究。E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn



孙成林(1973—),男,黑龙江鸡西人,博士,副教授,主要从事分子光谱方面的研究。E-mail: chenglin@jlu.edu.cn



王立军(1946—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事大功率半导体激光器的研究。E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn

● 下期预告

散斑技术在变形测量中的实际应用

陈志新^{1,2},梁 晋¹,郭 成¹

(1. 西安交通大学 机械工程学院,陕西 西安 710049;

2. 东华理工大学 机电工程学院,江西南昌 330013)

为了克服传统变形测量方法的局限性,实现对被测物整体变形的测量,同时得到测量范围内各点在任一时刻的具体位移,本文采用散斑法对变形进行精确的全面测量。首先,通过与传统方法的比较,反应散斑技术其有非接触、精度高、操作简单灵活、测量全面等优点。然后详细阐述了散斑法基本理论的五个方面,建立了相关数学模型,并根据相关理论完整开发出相应测量分析软件 XJTUDIC。利用该软件结合相应的硬件设备对具体的拉伸变形过程进行了完整的测量试验,并将结果与使用引伸计的传统测量方法比较,结果显示,误差在 $\pm 0.2\%$ 之内,充分验证了该方法及相应软件和硬件的可靠性、可行性及优越性,从而为变形的全面精确测量提供了一种有效可靠的工具和手段。