

大功率半导体激光器热阻测量的实验研究

辛国锋 沈力 皮浩洋 瞿荣辉 蔡海文 方祖捷 陈高庭

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

摘要 根据目前多数大功率半导体激光器模块只适合工作在准连续(QCW)状态下的特点, 提出了利用光谱方法测量半导体激光器温升进而计算得到热阻的计算方法。该方法具有简单、直观、快捷的特点, 同时避开了常规计算热阻方法要求半导体激光器工作在连续状态的局限性。其中在不同占空比、同一工作电流下得到的热阻值一致性较好, 更接近文献给出的数值, 具有实际应用价值。

关键词 激光器; 大功率半导体激光器; 准连续; 热阻; 峰值波长

中图分类号 TN248.4

OCIS 250.0250 250.5960 140.2010 140.2020

文献标识码 A

Experimental Study of Thermal Resistance Measurement for High Power Laser Diode Array

Xin Guofeng Shen Li Pi Haoyang Qu Ronghui Cai Haiwen
Fang Zujie Chen Gaoting

(Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract According to the characteristics of most high power laser diode array/stacks only working at quasi continuous wave(QCW), the calculation method of temperature rising by measuring the spectra for thermal resistance calculation is recommended, which is simple, direct, and fast. Requirements of continuous wave operation which are conventionally needed at calculating the thermal resistance are avoided. The thermal resistance, which is calculated at different duty cycles and the same working current is, well consistent and closer to the values given in previous references. The calculation methods have actual application values in manufacture process.

Key words lasers; high power laser diode; quasi continuous wave; thermal resistance; peak wavelength

1 引言

由于大功率半导体激光器有体积小、重量轻、转换效率高和价格便宜等优点, 它在远程传感、光谱分析、航空等领域的全激光系统中, 主要用来抽运各种固体激光介质, 同时还在激光医疗方面得到了广泛的应用。大功率半导体激光器的温升是其实际应用中的一个重要问题。温升导致激光器阈值电流增加、发射波长红移、模式的不稳定、器件寿命的降低和其他不利影响^[1~3]。因此, 大功率半导体激光器热特性的研究是激光领域的一个重要研究方向, 而热阻是其中一个主要参数。

在热特性中热阻是功率半导体激光器的一个主要参数, 根据热阻的大小可以判断在相同封装形式下的封装质量。Jason Carter 等^[4~6]已经报道了多种热阻测量的方法, 但由于存在测量精度高, 计算复杂或者要求工作在连续波(CW)状态下的特点, 这些方法都不完全适合只能工作在准连续(QCW)状态下的模块。本文根据目前多数大功率半导体激光器模块只适合工作在 QCW 状态下的特点, 提出了利用光谱方法测量半导体激光器温升进而计算得到热阻的不同计算方法。

收稿日期: 2010-06-17; **收到修改稿日期:** 2010-07-19

基金项目: 上海市自然科学基金(08ZR1421400)和上海市科学技术委员会(08DZ2230400)资助课题。

作者简介: 辛国锋(1975—), 男, 副研究员, 主要从事半导体光电器件方面的研究。E-mail: gfxin@siom.ac.cn

2 半导体激光器热阻的定义及测量方法

热阻是衡量器件散热性能优劣的物理量,是有源层相对于热沉的平均温升除以有源层中的热产生率^[1],即

$$R_T = dT/dP_T, \quad (1)$$

式中 T 为有源区温度, P_T 为热功率。

激光器热特性的表征主要是与测量其有源区的温度有关,有源区温度一般不能直接测量,可以通过测量激光器 $I-V$ 特性、 $I-P$ 特性和光谱特性来表征激光器的有源区温度,从而得到激光器热阻。半导体激光器的热阻值主要与器件结构、材料、制作工艺以及封装等因素有关。在理论上主要是建立热传导模型,通过平衡热传导方程来计算热阻。但是激光器有复杂的多层机构,理论计算不能准确地模拟激光器的热特性。所以,激光器热阻通常根据实验来获得,一般情况下测量热阻有以下几种方法:

1)通过结电压的测量,半导体激光器的电压降包括 P-N 结上的电压降和串联电阻上的电压降。对特定的工作电流,P-N 结上的电压降会因为结温升高而下降,这主要是由准费米能级的温度效应引起的。首先在某一电流和温度下测量较低占空比脉冲工作状态时激光器的电压降,此时可以近似认为激光器结温升很小,可以忽略。然后测量同一电流和温度下 CW 工作状态下激光器电压降,降低外界环境温度,使其电压降与脉冲工作状态情况下一致。则降低的温度量就可认为是激光器连续工作状态下的温升。根据该温升在除以在该电流下消耗的热功率即可得到器件的热阻。该方法需要精确测量器件的工作电压,同时要求该器件可以在 CW 状态下工作。

2)通过阈值电流测量,利用阈值电流的温度关系,同样先在窄脉冲下测量激光器阈值电流随环境温度变化的关系,作为标定曲线。然后在正常工作条件下测量激光器阈值电流的上升,就可以得到此时的结温。这一方法原理上只能测量阈值附近的结温,但是可以求得热阻,然后用于大的工作电流下结温的计算和分析。

3)通过光谱测量,对单纵模激光器器件测量纵模位置,多纵模器件测量激光器光谱的包络峰值或中心位置。首先在低占空比的脉冲工作状态下测试激光器的发光光谱,此时可以认为激光器结温升很小,可以忽略。然后改变环境温度,测试不同温度下的发光光谱,得到光谱包络峰值随温度变化的关系,作为一个标定曲线。最后再测量常温工作状态下激光器光谱,可以与标定曲线对照而获得该工作状态下的结温升。根据结温升和注入的电功率以及发光功率,计算得到器件的热阻。这一方法最为方便直接、快捷,可以在封装工艺过程中广泛应用。

利用方法 3),由测量得到的数据,可以通过以下几种途径计算得到器件的热阻:

a)在相同的占空比下,改变工作电流。不同工作电流下的激光波长与较小电流下的波长进行对比得到温度值。

$$R'_{Ti} = \frac{(\lambda_i - \lambda_1)/\lambda_T}{(I_i \cdot V_i - P_{fi} - I_1 \cdot V_1 + P_{f1}) \cdot D}, \quad R_T = \frac{\sum_i R'_{Ti}}{i}. \quad (2)$$

式中 I_1, V_1, P_{f1} 和 λ_1 分别为起始时的电流,电压,光功率和工作波长; I_i, V_i, P_{fi} 和 λ_i 分别为较大值时的电流,电压,光功率和工作波长; R'_{Ti} 为计算到的热阻值, R_T 为平均值; λ_T 为波长温度系数; D 为驱动电流的占空比, i 为测得的实验数据组数。

b)在相同的占空比下,改变工作电流。用相邻工作电流之间的波长差得到的温度值与热功率对比。

$$R'_{Ti} = \frac{(\lambda_{i+1} - \lambda_i)/\lambda_T}{(I_{i+1} \cdot V_{i+1} - P_{fi+1} - I_i \cdot V_i + P_{fi}) \cdot D}, \quad R_T = \frac{\sum_i R'_{Ti}}{i}. \quad (3)$$

式中 I_i, V_i, P_{fi} 和 λ_i 分别为某一电流,电压,光功率和工作波长; $I_{i+1}, V_{i+1}, P_{fi+1}$ 和 λ_{i+1} 分别为与前者相邻的电流,电压,光功率和工作波长。

c)不同占空比、同一工作电流下的波长差别得到的温度值与热功率对比。

$$R'_{Ti} = \frac{(\lambda_{i2} - \lambda_{i1})/\lambda_T}{(I_{i2} \cdot V_{i2} - P_{fi2}) \cdot D_2 - (I_{i1} \cdot V_{i1} - P_{fi1}) \cdot D_1}, \quad R_T = \frac{\sum_i R'_{Ti}}{i}. \quad (4)$$

式中 I_{i1}, V_{i1}, P_{i1} 和 λ_{i1} 分别为 D_1 占空比时的电流, 电压, 光功率和工作波长; I_{i2}, V_{i2}, P_{i2} 和 λ_{i2} 分别为 D_2 占空比时的电流, 电压, 光功率和工作波长。

3 实验结果分析

半导体激光器模块的封装形式如图 1 所示。将该模块固定于循环冷却水底座上, 并设定循环水温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 引出电极如模装图所示, 输出功率用热电堆高功率探头测试, 光谱用海洋光学公司的光纤光谱仪测试, 工作电压用示波器进行测试, 驱动电源的电流、占空比可调。由于采用热电堆功率计测试输出功率, 测试得到平均功率, 再根据此平均功率和驱动电流的占空比可以直接得到峰值功率。

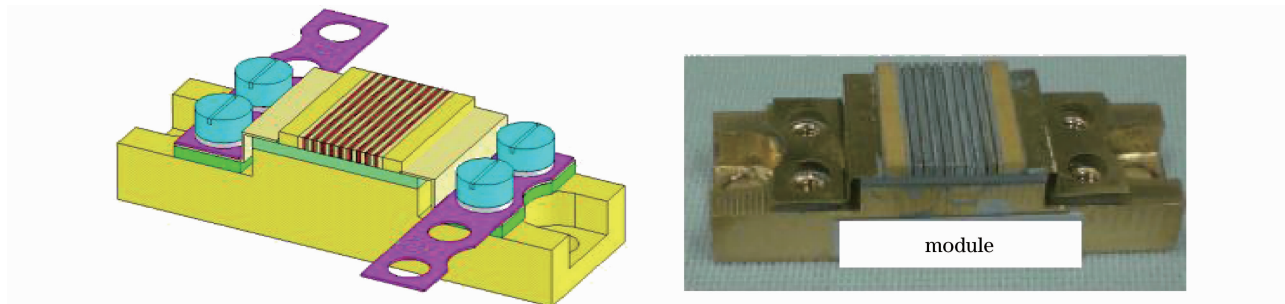


图 1 G 封装半导体激光器的模装图与实物图

Fig. 1 Structure and picture of the G packaging laser diode module

图 2 给出了编号为 2008M09-05 模块在不同工作电流和不同占空比下的中心波长变化, 从图中可以看出, 波长随工作电流的增加而增加, 而且在较高占空比时该斜率较高, 同时可以看出在相同的工作电流下, 中心波长随占空比的增加而增大。中心波长的变化直接反映了模块内部温度的变化。图 3 给出了该模块在不同占空比下的功率-电流 (P - I) 曲线, 从图中可以看出随占空比的增加, 100 A 时的峰值功率由 714 W (1% 占空比) 降低到 656 W (5% 占空比), 同时斜率效率从 1.01 W/A (1% 占空比) 降低到 0.95 W/A (5% 占空比)。

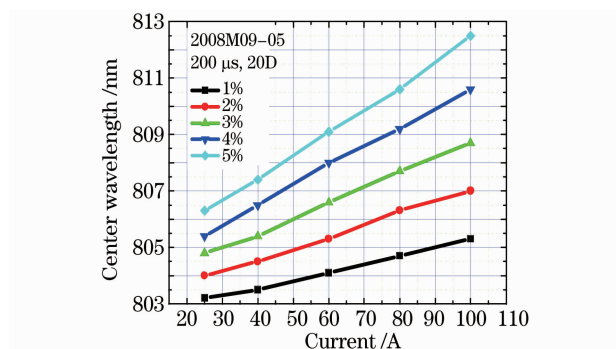


图 2 模块在不同电流、占空比下的波长变化

Fig. 2 Center wavelengths changing at different currents and different duty cycles

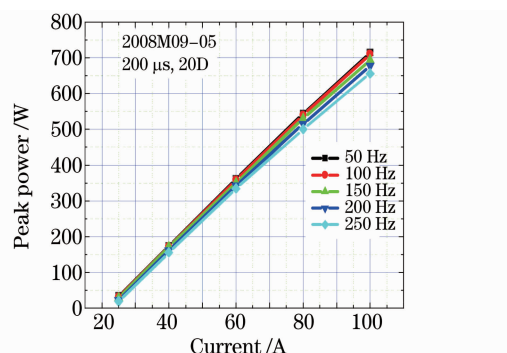


图 3 不同占空比时模块的 P - I 曲线

Fig. 3 P - I curves of the module at different duty cycles

相同工作条件下, 改变半导体激光器模块的冷却温度, 可以得到波长温度系数 $\lambda_T = 0.25\text{ nm/K}$, 与文献 [7] 测试值基本相同。测量了激光器芯片间距分别为 $0.45, 0.70$ 和 1.05 mm , G 封装形式高功率半导体激光器模块在不同工作电流、不同占空比下的输出功率、中心波长等参数, 再通过第 2 节中描述的方法对热阻进行了计算, 计算结果如表 1~3 所示。

从表 1~3 给出的计算结果可以看出, 当占空比较小时, 用方法 a) 和方法 b) 计算得到的热阻值偏大, 随着占空比的增加, 计算得到的热阻值减小, 而用方法 c) 计算到的所有热阻值基本相同。当占空比较大时, 用方法 a) 和方法 b) 得到的热阻值与用方法 c) 得到的热阻值相当。用该方法计算得到的热阻值与公司报道同类封装结构半导体激光器模块热阻值相当。

表1 G封装间距为0.45 mm,包括6条Bar的X2007M-03模块的热阻

Table 1 Heat resistance of G packaging X2007M-03 module with pitch 0.45 mm, including 6 Bars

Duty cycle / %	Thermal resistance					
	Method a)	Method b)	Method c)			
			1%	2%	3%	4%
1	3.45547	3.5856				
2	2.8962	2.8737	2.1234			
3	2.7258	1.8701	2.2115	2.2956		
4	2.7420	1.9691	2.1438	2.1530	2.0145	
5	2.9193	2.1350	2.1881	2.2072	2.1659	2.3061

表2 G封装间距为0.70 mm,包括9条Bar的2008M09-05模块的热阻

Table 2 Heat resistance of G packaging 2008M09-05 module with pitch 0.70 mm, including 9 Bars

Duty cycle / %	Thermal resistance					
	Method a)	Method b)	Method c)			
			1%	2%	3%	4%
1	1.3184	1.2526				
2	1.0016	0.9181	0.9078			
3	0.8512	0.7791	0.8803	0.8535		
4	0.9275	0.8028	0.8666	0.8470	0.8406	
5	0.7892	0.7186	0.8506	0.8328	0.8229	0.8063

表3 G封装间距为1.05 mm,包括3条Bar的A11模块的热阻

Table 3 Heat resistance of G packaging a11 module with pitch 1.05 mm, including 3 Bars

Duty cycle / %	Thermal resistance					
	Method a)	Method b)	Method c)			
			2%	5%	10%	15%
2	1.3814	0.8002				
5	0.8957	0.9869	0.6242			
10	0.8932	0.8904	0.8814	0.7887		
15	0.8754	0.8383	0.6068	0.7110	0.6939	
20	0.7477	0.8185	0.6104	0.6757	0.7043	0.6205

4 结 论

提出了高功率半导体激光器模块工作在QCW状态下的热阻测试和计算方法,对同一类型G封装,不同间距的半导体激光器模块的基本特性和热阻进行了测试,对比所提出的计算方法,可以看出利用方法c)进行计算热阻的一致性较好,与产品给出的热阻值基本相同。

参 考 文 献

- Zhang Yanxin, Wang Jingwei, Wu Di *et al.*. A new package structure for high power single emitter semiconductor laser and performance analysis[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1186~1191
张彦鑫,王警卫,吴迪等.一种新型大功率单发射腔半导体激光器及其特性[J].*中国激光*, 2010, **37**(5): 1186~1191
- Xin Guofeng, Qu Ronghui, Chen Chen *et al.*. Characterization of a 2D array high power semiconductor laser module[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 447~450
辛国锋,瞿荣辉,陈晨等.大功率半导体激光器二维阵列模块特性分析[J].*中国激光*, 2006, **33**(4): 447~450
- Shen Li, Xin Guofeng, Pi Haoyang *et al.*. study on lateral distribution of working wavelength and packaging induced stress in laser diode array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 461~464
沈力,辛国锋,皮浩洋等.半导体激光器阵列横向波长分布与键合应力关系的研究[J].*光学学报*, 2010, **30**(2): 461~464

- 4 Jason Carter, David Snyder, Jerry Reichenbaugh. Temperature dependence of optical wavelength shift as a validation technique for pulsed laser diode array thermal modeling[C]. 19th IEEE SEMI-THERM Symposium, 2003
- 5 Joanne S. Manning. Thermal impedance of diode lasers: comparison of experimental methods and a theoretical model[J]. *J. Appl. Phys.*, 1981, **52**(5): 3179~3184
- 6 R. Pernas, M. Sanchez, R. Pena-Sierra *et al.*. A new method to determine the thermal resistance in semiconductor lasers [C]. Fourth IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems, Aruba, 2002
- 7 Xin Guofeng, Cheng Can, Qu Ronghui *et al.*. Study of spectral characteristics of external cavity semiconductor laser with volume Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1821~1826
辛国锋, 程 灿, 瞿荣辉 等. 体布拉格光栅外腔半导体激光器光谱特性研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1821~1826