

# 一种精确的同轴封装 DFB 激光器组件的热学模型

侯小珂<sup>1,2</sup> 张丽卿<sup>2</sup> 张胜利<sup>2</sup> 王雷<sup>2</sup> 姚勇<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

(<sup>2</sup> 深圳新飞通光电子技术有限公司, 广东 深圳 518037)

**摘要** 基于有限元方法(FEM)建立了精确的同轴封装无致冷分布反馈布拉格(DFB)激光器发射组件(TOSA)的热分析模型。对 TOSA 的热场分布和结温进行模拟和分析,并通过实验验证热学模型的正确性。利用极窄脉冲法测量 TOSA 的峰值波长随壳温的变化,拟合了壳温与波长的定量关系式。通过实测得到激光器的结温、晶体管形(TO)封装管壳的壳温与热功耗的关系曲线,并同时针对不同热功耗下的激光器结温和 TO 封装管壳的壳温进行模拟,FEM 模拟的结果与实测结果十分吻合。根据实测的温度梯度求得激光器组件在不同环境温度下的热阻。所建立的热学模型具有较高的精确性,可以用于 TOSA 及光收发模块的散热设计。

**关键词** 激光器;半导体激光器;有限元方法;热学模型;热阻

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1002006

## Precise Thermal Simulation Module for DFB Laser Sub-Assembly with Transistor Outline Package

Hou Xiaoke<sup>1,2</sup> Zhang Liqing<sup>2</sup> Zhang Shengli<sup>2</sup> Wang Lei<sup>2</sup> Yao Yong<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

(<sup>2</sup> NeoPhotonics Corporation (Shenzhen), Shenzhen, Guangdong 518037, China)

**Abstract** A precise thermal simulation model for distributed feedback Bragg (DFB) laser transmitter optical sub-assembly (TOSA) with uncooled transistor outline package is established based on the finite element method (FEM). The thermal gradient and junction temperature are simulated and analyzed. The self-consistency of this model is verified by comparing with experiments. The change of lasing peak wavelength as a function of case temperature is measured by pulse injection and the relationship is calculated. The relationships between laser junction temperature, case temperature of transistor outline (TO) case and thermal power are obtained by measurements. The laser junction temperature and TO case temperature are also simulated at different thermal powers. The simulated results are agree well with the measured results. The thermoresistance of the laser subassembly is calculated based on the measured temperature gradient at different environmental temperatures. The thermal model reported by this paper is very precise and can be used for thermal design of TOSA and transceiver.

**Key words** lasers; semiconductor laser; finite element method; thermal model; thermoresistance

**OCIS codes** 140.5960; 140.6810; 250.5960

## 1 引言

通信用半导体激光器的高温工作性能对于实现通信模块的稳定性和可靠性非常重要。半导体激光

器的工作特性与温度密切相关,温度的变换可以引起发光效率、输出功率、峰值波长、阈值电流等性能的变化,并会影响器件寿命。激光器的自生热现象,

收稿日期: 2013-03-14; 收到修改稿日期: 2013-05-29

基金项目: 广东省和教育部产学研合作项目(2010B090400306)、深圳市基础研究计划(JC201105160592A)

作者简介: 侯小珂(1978—),男,博士,主要从事半导体光电材料与器件等方面的研究。E-mail: xiaoke\_hou@aliyun.com

以及封装对散热的限制都会导致器件工作温度升高,影响器件性能。半导体激光器的光学封装根据材料、几何尺寸和形状的不同会产生明显的温度梯度,需要对热场分布进行模拟。

分布反馈布拉格(DFB)激光器由于其输出激光的线宽窄、啁啾小、动态特性好、单纵模特性好以及可输出特定波长,是目前高速光纤传输网中的通用理想光源,特别适合应用在高速、大容量密集波分复用(DWDM)光通信系统<sup>[1-4]</sup>。为保证 DFB 激光器在系统中的稳定工作,需要关注其温度依赖特性,进行热学管理。建立精确的 DFB 激光器热分析模型来预测激光器发射组件(TOSA)的热性能,是改善激光器器件设计和封装设计的重要手段<sup>[5-7]</sup>。

本文建立了精确的 TOSA 的热分析模型,对晶体管形(TO)封装下激光器的热场分布和结温进行模拟和分析。利用极窄脉冲法测量无致冷 TO 封装 DFB 激光器组件的峰值波长随壳温的变化,并测得

不同驱动电流下结温与壳温随热功耗的变化曲线,通过实验验证了热学模型的正确性。

## 2 实 验

### 2.1 TO 封装激光器组件

商用的 TO 封装 TOSA 的典型结构如图 1 所示。所用的激光器为 DFB InP 激光二极管,中心发射波长位于 1310 nm。通过采用金属化学气相沉积(MOCVD)的方法在 n 型 InP 衬底上生长 InGaAlAs 多量子阱结构的外延层,然后制作 p 型 InP 覆盖层和 InGaAs 接触层,最后通过湿法刻蚀形成脊形结构。采用 Au-Ti-Pt-Au 复合电极形成 p 型金属接触。激光芯片安装在 AlN 衬底上,然后采用 TO 封装。整个 TOSA 包含 TO 管座、热沉、管壳、套管、隔离器、连接器和激光器芯片,其结构如图 1 所示。

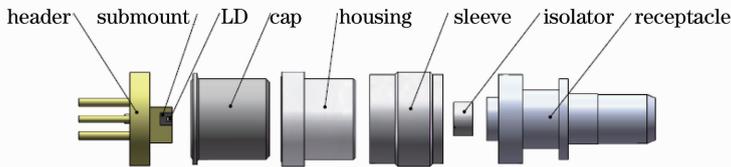


图 1 TOSA 的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of TOSA

### 2.2 实验结果

采用周期性的窄脉冲注入方式,尽量减小激光器自身发热效应,近似认为激光器芯片的温度与环境温度一致<sup>[8]</sup>。采用占空比可调的信号源驱动 TOSA 工作,并逐渐减小脉冲的占空比,测试峰值波长随占空比的变化。发现当占空比小于 5% 时峰值波长几乎保持稳定,继续降低占空比时峰值波长变化不明显,近似认为此时激光器的自身发热效应已经很小,在此条件下激光器的结温和 TO 管壳的壳温近似相等。

整个 TOSA 安置在铝合金基座上,整体放入烘箱。在 5% 的占空比下,逐步升高环境温度,并调节驱动电压,使得激光器的峰值功率在每个环境温度下均稳定在 -30 dBm,测量峰值波长,并记录 TO 管壳的壳温。测量结果如图 2 所示。通过对占空比和输出功率的控制,使得激光器自身发热稳定且小到可以忽略。根据图 2 所示壳温与波长曲线,在壳温等于结温的假定下,拟合了如下定量关系式:

$$\lambda = 0.0829 \times T_j + 1305.9, \quad (1)$$

式中  $\lambda$  为峰值波长,  $T_j$  为激光器的结温。

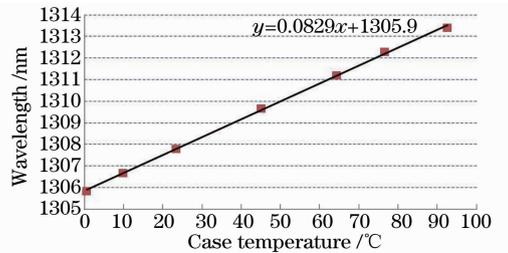


图 2 测量的激光器峰值波长随 TO 壳温的变化  
Fig. 2 Measured lasing peak wavelength as a function of TO case temperature

分别在 0 °C、20 °C 和 80 °C 下测试激光器的热功耗与结温、波长的关系。改变驱动电流,记录电压,从而得到总功率。根据激光器在不同温度下的斜率效率求得不同驱动电流下的光功率,进而求得热功耗:

$$P_T = P - \eta_s I, \quad (2)$$

式中  $P_T$  为热功耗,  $P$  为总功率,  $\eta_s$  为斜率效率,  $I$  为驱动电流。其中,根据厂商提供的激光器规格信息,量子效率的取值如下:0 °C 时为 0.55, 20 °C 时为 0.3, 80 °C 时为 0.03。

采用光谱分析仪记录峰值波长,并根据(1)式求

得每个波长相应的结温,记录 TOSA 的壳温。

### 2.3 FEM 模拟

仿真用的三维空间的瞬态热传导的控制方程为

$$\kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (3)$$

式中  $x, y, z$  分别为三个维度的坐标轴,  $T$  为温度,  $\kappa$  为热传导系数,  $\dot{Q}$  为热源密度,  $\rho$  为密度,  $C_p$  为热容。在达到稳态后,即

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0, \quad (4)$$

热控制方程为

$$\kappa \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{Q} = 0, \quad (5)$$

根据牛顿冷却定律,热对流传输方程的表达式为

$$q_c = h_c A (T - T_0), \quad (6)$$

式中  $q_c$  为总热量,  $h_c$  为热传输系数,  $A$  为表面积,  $T$  为表面温度,  $T_0$  为参考温度。

假设铝合金基座的热容量相对管芯无限大,其温度保持恒定,等于环境温度。根据上述理论方程,采用有限元方法(FEM)进行热分析计算,使用的是

ANSYS 软件。首先将 TOSA 的几何结构导入 ANSYS 软件,并设置每层的材料参数,然后对 TOSA 的热源和边界条件进行设置,建立实体模型,如图 3 所示。

针对实体模型进行网格划分生成有限元模型,所有施加到几何实体边界上的约束或载荷最终传递到有限元模型上进行求解。对 TOSA 来说,主要存在如下热阻:激光二极管的热阻、AlN 热沉的热阻、TO 管座的热阻、TO 管壳的热阻和导热垫片的热阻。表 1 中列出了作为 FEM 输入参数的热学部件的热传导系数,其他数据可以根据实验测得。模拟的环境温度分别设定为 0 °C、20 °C 和 80 °C,并对空气对流进行模拟,根据烘箱的风口尺寸、风速及与待测工件的距离等因素计算得到对流交换系数,上表面、侧面和下表面的对流交换系数分别为 20 W/(m<sup>2</sup> · K)、18 W/(m<sup>2</sup> · K)和 15 W/(m<sup>2</sup> · K),风向如图 3(a)中所示。在此基础上,模拟了 TOSA 的热功耗与结温的关系,并模拟了 TO 封装的热场分布。

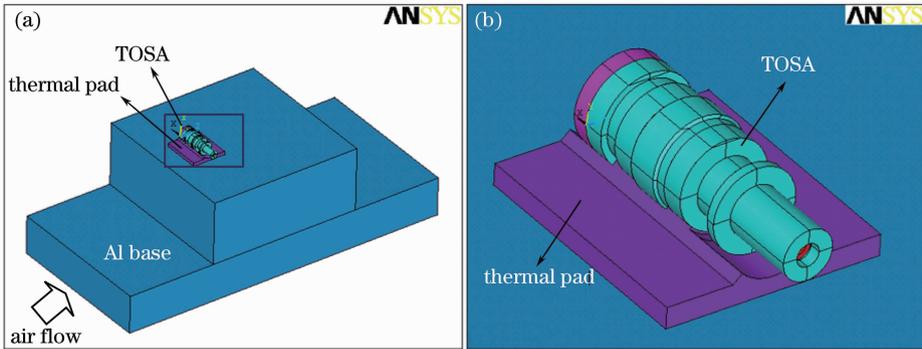


图 3 TOSA 在(a)铝合金基座与(b)导热垫片上的 FEM 模型

Fig. 3 FEM module on (a) Al-base and (b) thermal pad of the TOSA

表 1 FEM 输入参数的热学部件的热传导系数

Table 1 Thermal conductivities of the thermal components used in FEM

Component	Material	Thermal conductivity /[W/(m · K)]
Laser chip	InP	97
Heat sink	AlN	170
TO base (Kovar)	alloy (Fe, Co, Ni)	17
TO case	SUS304	16.2
Thermal pad	metal doped polymer	2.8
Al base	Al 6061 T6	167

$$Q(t) = C \frac{d\Delta(T)}{dt} + \frac{\Delta(T)}{R_T}, \quad (7)$$

式中  $Q(t)$  为激光器组件消耗的总热功率,  $\Delta(T)$  为组件的温升,  $R_T$  为激光器的热阻(K/W),  $C$  为激光器组件的热容量。上式的第一项表示激光器组件温度升高所吸收的热功率,第二项表示激光器组件温度升高后向周围耗散的热功率。

激光器组件消耗的总热功率为

$$Q = (1 - \eta_D) P_{in}, \quad (8)$$

式中  $\eta_D$  为外微分量子效率,  $P_{in}$  为注入激光器的电功率。达到热平衡后,即激光器组件体热源在连续工作状态下的热方程式变为

$$(1 - \eta_D) P_{in} = \frac{\Delta(T)}{R_T}, \quad (9)$$

## 3 结果和讨论

激光器组件的热方程式为

据此可得出激光器组件的热阻表达式

$$R_T = \frac{\Delta T}{(1 - \eta_D) P_{in}}, \quad (10)$$

式中  $\Delta T$  和  $\Delta P_{in}$  分别为不同注入条件下激光器组件的温度差和注入电功率差。

采用 FEM 对激光器组件的热场分布进行了模拟,求得了不同驱动电流和环境温度下激光器、AlN 热沉和 TO 管座的热场分布。图 4 为环境温度为

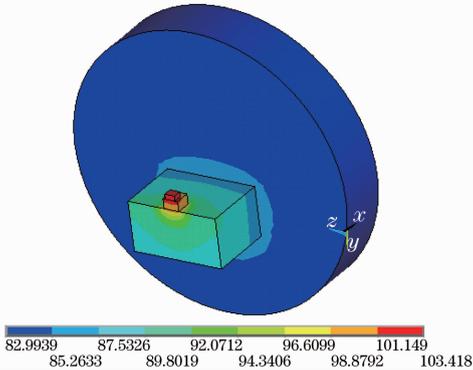


图 4 TOSA 的内部热场分布

Fig. 4 FEM results of the thermal gradients inside the TOSA

80 °C 和为驱动电流 80 mA 时的热场分布。为了清晰示出 TOSA 内部的热场,移去了 TO 管壳和铝合金基座,但该图中的热场分布是在包含 TO 管壳和铝合金基座的条件下模拟得出的。

在激光器工作于 80 mA 驱动电流的情况下,环境温度为 0 °C、20 °C、80 °C 时激光器管芯到 TO 管壳的温度梯度分别为 16.7 °C、17.9 °C 和 20.4 °C,随温度升高,温度梯度增加。这主要是高温下激光器的外量子效率较低,自身发热效应更明显。实测结果也表明,在相同的注入电流下,高温下激光器组件消耗的总热功率更高。

分别在环境温度为 0 °C、20 °C、80 °C 时,逐渐增加激光器的驱动电流,根据(2)式计算 TOSA 的热功耗,并依据峰值波长计算激光器管芯的结温。图 5 所示为激光器的结温和 TO 管壳的壳温随热功耗变化的关系曲线,其中实线表示实测结果,虚线表示模拟结果。激光器的驱动电流从 30 mA 到 80 mA。FEM 模拟的结果与实测结果十分吻合,表明所建立的热分析模型具有较高的精确性,完全可以用于 TOSA 的散热设计。

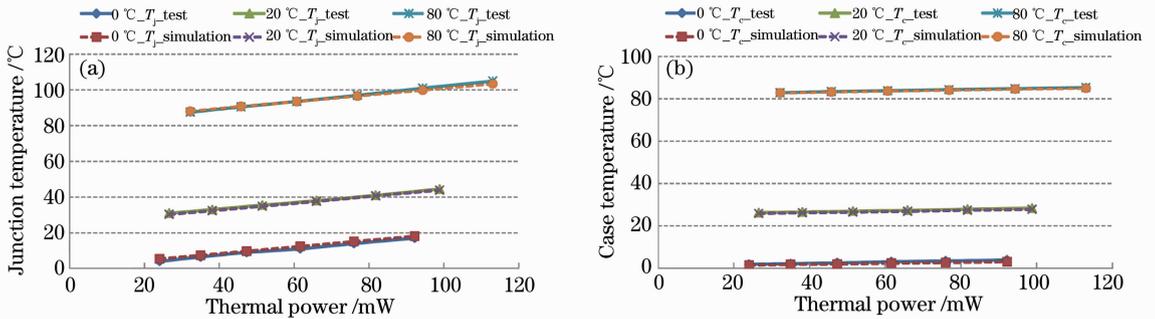


图 5 激光器的(a)结温和(b)TO壳温随热功耗的变化关系的测量和模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of measured and simulated results for laser (a) junction temperature and (b) TO case temperature as a function of thermal power

已有报道通过激光辐射材料的表面温度分析<sup>[9]</sup>或啁啾特性<sup>[10]</sup>来确定材料的热阻。测得激光器结温、TO 壳温与热功耗的关系曲线,将其作为测量激光器热阻的依据。根据图 5 的实测结果,得知激光器结温到 TO 壳温的温差,参照激光器组件的热阻表达式(10)式,可以求得激光器组件在环境温度为 0 °C、20 °C、80 °C 时的热阻分别为 162、163、166 K/W。

## 4 结 论

建立了精确的 DFB 激光器在无致冷 TOSA 封装结构下的热分析模型,利用 ANSYS 软件对模型进行

模拟计算。基于 FEM 分析,模拟了在不同环境温度和驱动电流下激光器管芯和 TO 封装结构的热场分布,并计算求得在不同驱动电流及热功耗情况下的激光器结温和 TO 封装壳温的变化。进一步采用基于脉冲注入法的波长测试来测量 DFB 激光器的结温,拟合了峰值波长与结温的定量关系式,并测得相应于不同驱动电流的热功耗和结温、壳温。实测结果和热分析模型高度一致,表明了模型的准确性。

该模型有助于进步了解激光器的高温工作性能,可以用于 TOSA 的散热设计,并进一步用于光收发模块的散热设计。为了改善产品的性能和可靠性,同时使得 TOSA 和光收发模块有更好的稳健性,建立 FEM 热分析模型非常关键,也是进一步开

展模拟仿真以辅助结构设计和材料选择的基础。通过修改部件的热传导系数和边界条件,也可以将该实验方法和热分析模型应用于其他结构的激光器和封装形式。

### 参 考 文 献

- 1 T Fujisawa, S Kanazawa, W Kobayashi, *et al.*. 50 Gbit/s uncooled operation of 1.3  $\mu\text{m}$  electroabsorption modulator integrated with DFB laser[J]. *Electronics Letters*, 2013, 49(3): 204–205.
- 2 K Tsuzuki, Y Shibata, N Kikuchi, *et al.*. Full C-band tunable DFB laser array copackaged with InP Mach-Zehnder modulator for DWDM optical communication systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(3): 521–527.
- 3 N Nasu, T Mukaiharu, T Takagi, *et al.*. 25-GHz-spacing wavelength-monitor integrated DFB laser module for DWDM applications[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(2): 293–295.
- 4 Liu Guoli, Wang Xu, Zhang Jingyuan, *et al.*. Wavelength tunable single ridge waveguide electroabsorption modulated DFB laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2001, 28(12): 1057–1060.  
刘国利, 王 圩, 张静媛, 等. 单脊条形可调谐电吸收调制 DFB 激光器[J]. *中国激光*, 2001, 28(12): 1057–1060.
- 5 Huang Jiasheng, Miao Rongsheng, Lu Han, *et al.*. Theoretical and experimental thermal analysis of InP ridge lasers on submounts and TO packages[J]. *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 2007, 7(2): 363–368.
- 6 Li Xun, Huang Weiping. Simulation of DFB semiconductor lasers incorporating thermal effects[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1995, 31(10): 1848–1855.
- 7 Zhang Jianwei, Ning Yongqiang, Zhang Xing, *et al.*. Analysis of the thermal model based on the carrier injection mechanisms within the semiconductor laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1002003.  
张建伟, 宁永强, 张 星, 等. 基于载流子注入产热机制的半导体激光器热模型分析[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1002003.
- 8 Song Haipeng, Wen Jimin, Zeng Xiongwen, *et al.*. Research of pulse injection method for measuring LD chip temperature[J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(3): 407–410.  
宋海鹏, 温继敏, 曾雄文, 等. 测量激光器结温的脉冲注入法研究[J]. *中国激光*, 2005, 32(3): 407–410.
- 9 Elhadj Selim, Matthews J Manyalibo, Yang T Steven, *et al.*. Determination of the intrinsic temperature dependent thermal conductivity from analysis of surface temperature of laser irradiated materials[J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 96(7): 071110.
- 10 Hua Tan. Analysis of the reduced thermal conductivity in InGaAs/GaAs quantum dot lasers from chirp characteristics[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(12): 121116.

栏目编辑:张 腾