

脊形结构 GaN 蓝光激光器的热模拟分析*

叶晓军 种 明 陈良惠

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 利用二维热传导模型分析了 GaN 激光器的温度特性. 计算了有源区在连续工作条件下的最大温升, 分析了激光器工作时的功率密度和 p 电极比接触电阻率等参数对温度特性的影响. 模拟结果表明, 采用不同衬底和不同装配形式对器件温度特性的影响很大, 正装形式下, 窄的脊形条宽能提高器件的高温工作稳定性.

关键词: 半导体激光器; GaN; 热模拟; 热阻

PACC: 6780G; 7280E; 8220W

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)12-1680-05

1 简介

GaN 基蓝紫光激光器是高密度光存储系统中最有希望的光源. 目前利用 InGaN 多量子阱结构已经实现了 400~430nm 波段的室温连续激光. 但是蓝紫光激光器要在高密度光存储系统中被广泛采用还有一些障碍, 除了激光光斑低远场发散角纵横比以及基横模工作的实现问题之外, 可靠性也是一个重要方面. 在光存储系统应用中, 要求激光器能工作在 0~80°C 之间. 通过改善激光器的温度特性^[1]能确保器件实现高温下稳定工作, 真正达到实用化水平.

本文采用二维热传导模型^[2]分析了脊形 GaN 激光器的温度特性. 利用二维有限元方法分析了激光器内部温度在典型测试条件下的变化情况. 模拟中器件的网格划分采用手动设置, 根据需要选择网格的疏密程度.

2 模拟模型

含时间热传导方程可写成如下形式:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \Delta \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + g \quad (1)$$

C 为单位体积物质的比热; K 为热传导系数; g 为单位体积热产生率. 模拟所采用结构模型见图 1. 假定各层外延片是均匀的, 外延层之间的温度函数满足温度连续分布和热流连续两个条件, 表示成下面两式:

$$T_i = T_{i+1} \quad (2)$$

$$K_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \Big|_{x=x_i} = K_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial x} \Big|_{x=x_{i+1}} \quad (3)$$

模拟中热沉的边界采用恒温近似; 对其他边界, 由于管芯内产生的热量主要都传到热沉上, 管芯与周围空气相交换的热量很小, 因此可以认为边界绝热条件成立

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{\text{边界}} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{\text{边界}} = 0 \quad (4)$$

方程(1)中的热源项 g 在不同层内的表达式是不同的. 导致 GaN 激光器管芯内温度升高的热源主要有: (1) 焦耳热, 主要由体内电阻及表面接触电阻造成; (2) 非辐射复合产生的热量, 主要在有源区内; (3) 自发发射吸收. 其中自发发射吸收所产生的热量很小, 另外有源区中的非辐射复合所产生的热量被 Thomson 冷却效应所补偿^[3]. 因此在模拟中只考虑各层焦耳热对激光器发热的影响. 图 1 给出模拟分析中所采用的脊形结构, 模拟中对实际器件结构进行了简化. 根据 GaN 激光器的情况, 热量主要来自

* 国家高技术研究发展计划资助项目(批准号: 2002AA31116Z)

叶晓军 男, 博士研究生, 主要从事 GaN 基蓝紫光激光器的研制.

2003-12-16 收到, 2004-02-05 定稿

p 电极、p-AlGaIn 以及有源区, 所以模拟中主要考虑这三层的焦耳热. 若激光器工作电流为 I , 工作电流密度为 J , p 电极比接触电阻率为 ρ_{sh} , 则 p 电极上的压降为 $V_c = J\rho_{sh}$, 相应产生热量为 IV_c ; p-AlGaIn 层的压降根据 $V_p = hJ/(q\mu_p p_p)$ 求得, 其中 h 是层厚, q 是单位电荷, μ_p 是空穴迁移率, p_p 是空穴浓度; 有源区压降 $V_a = E_g/q$, 式中 E_g 是有源区材料的禁带宽度, 一般在 3.5eV 左右.

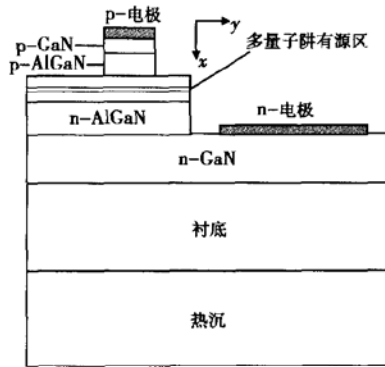


图 1 GaN 激光器的结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of GaN laser diode

模拟中用到的材料参数见表 1. $Al_xGa_{1-x}N$ 和 $In_yGa_{1-y}N$ 的热导系数没有相关的文献报道, 模拟中用 GaN, AlN 和 InN 参数的线性插分得到.

表 1 不同材料的热导率^[4]

Table 1 Thermal conductivities of different materials

材料	GaN	AlN	InN	蓝宝石	Au	Cu	SiC
热导率/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	130	285	45	41.9	317	401	500

图 2 给出一个模拟结果, 温度分布用等温线分布表示, 而热流分布用下列方程的等值线表示^[5]:

$$F(x, y) = \int_0^x [k \frac{\partial T(x_1, y)}{\partial x_1}] dx_1 + \iint_{x, y} g(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \quad (6)$$

式中 $[k \frac{\partial T(x_1, y)}{\partial x_1}]_y$ 是热流矢量的 y 分量. 式中右边第二项是为保持等值线的微分连续.

基于计算结果, 器件的热阻值可以用下式计算出来:

$$R_{th} = \Delta T_{act}/Q_{total} \quad (7)$$

式中 ΔT_{act} 是有源区中温度的升高; Q_{total} 是总的产生热量. 定义 Q_{total} 包括了所有产生的热量, 因此计算出来的热阻是总值, 但在实际器件中, 热阻还和具体的热源分布有关. 前面已经指出在 GaN 激光器

中, 有源区外的一些区域也会产生很多热量, 比如 p 电极层以及 p-AlGaIn 层. 由于这个原因, 上式定义的热阻就会小于实际热量只在有源区产生的情形.

3 二维有限元模拟

模拟中激光器的工作参数如下: 电流密度 $10kA/cm^2$, 尺寸为 $10\mu m \times 600\mu m$, 激光器处在连续工作状态. p 电极比接触电阻率和 p-AlGaIn 材料的电阻率 $\rho_p = 1/(q\mu_p p_p)$ 分别为 $10^{-4} \Omega \cdot cm^2$ 和 $10\Omega \cdot cm$, 这两个参数是通过实验获得的. p-AlGaIn 层的厚度一般在 $0.6\mu m$. 考虑激光器正装和倒装两种不同的装配形式, 激光器衬底的厚度设为 $80\mu m$, 热沉采用 Cu, 厚度为 $300\mu m$. 图 2 给出了两种不同装配形式下器件内部温度分布和热流分布的情况.

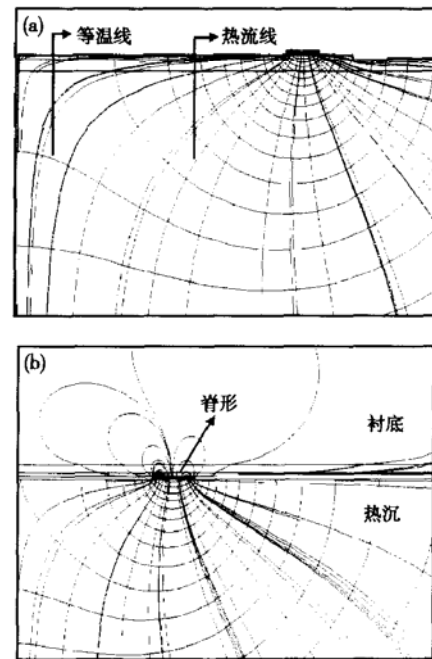


图 2 激光器内部的温度和热流分布示意图 (a) 正装; (b) 倒装
Fig. 2 Temperature and heat-flow distribution in the laser diode (a) p-up configuration; (b) p-down configuration

3.1 衬底的影响

GaN 激光器中对温度特性不利的一个因素是采用了蓝宝石衬底. 蓝宝石衬底的热导只有 GaAs 的一半, 并且在温度升高过程中还会变小. SiC 由于其热导系数大并且和 GaN 的失配度小, 许多人一直在尝试使用 SiC 衬底. 另外由于 GaN 单晶生长技术

的提高,出现了 GaN 衬底,大大改进了外延材料的质量,其热导系数也高于蓝宝石,因此散热性能较好.不同衬底的热阻计算值见图 3.

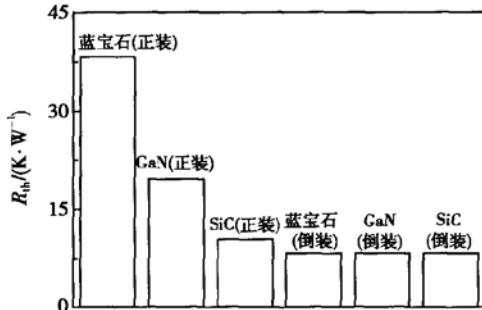


图 3 不同衬底和装配形式的计算热阻

Fig. 3 Calculated thermal resistances of laser diodes with different substrates and configurations

从图 3 可以看到,管芯采用倒装装配后,不同衬底的激光器的模拟热阻值几乎相同.这是由于管芯的发热大部分向下传导到热沉上,所以热阻较低.因此对生长在蓝宝石衬底上的 GaN 激光器,采用倒装装配是解决热特性的一个好方法.

3.2 条宽的影响

图 4 给出的是不同衬底和装配形式下的热阻和条宽的关系.通常热阻应该和垂直热流方向的横截面积成反比,然而图中正装的曲线并不完全和 $1/W$ 成正比,这是由于热流扩散效应.有源区产生的热量不是直接扩散到热沉,而是从侧向扩展传输,见图 2(a).而对倒装的脊形激光器,热阻和 $1/W$ 几乎成线性关系.倒装时大部分热量通过脊形向下传输到热

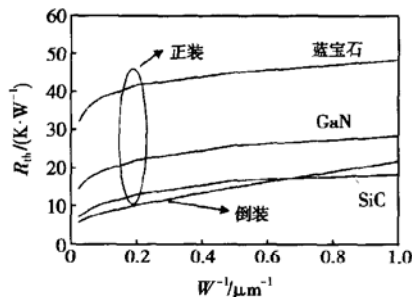


图 4 不同衬底和装配形式的热阻与脊形条宽的关系

Fig. 4 Thermal resistances of laser diodes with different substrates and configurations as a function of ridge widths

沉上,没有扩展效应,在脊形区域,热流几乎是一维

的,见图 2(b).

另外从图中可以看出,在脊形条宽变窄后,正装的热阻增加得比较缓慢,而倒装脊形结构的热阻一直呈线性上升.在一定的阈值电流密度下,总的产生热量和条宽成正比,所以正装窄条脊形激光器的有源区温度升高幅度会低一些.因此正装情形下,窄条脊形激光器在高温下工作有更好的温度特性.

3.3 p 电极比接触电阻率

前面的模拟中,p-电极比接触电阻率和 p-Al-GaN 电阻率取值都为比较理想的情况,但在实际的 GaN 激光器中,p-AlGaN 光限制层中的载流子迁移率可能很低,导致电阻率很高,引入大的压降;另外 p 电极层的比接触电阻率值过高,也会引入大的压降.随着材料生长技术的提高,p-AlGaN 层材料的影响已经越来越小.p 电极层的比接触电阻率和实际的工艺过程很有关系,因此我们在这里讨论 p 电极层对激光器温度特性的影响.

模拟中激光器的衬底用目前最常用的蓝宝石衬底,热沉为铜.假设 p-AlGaN 的电阻率为 $10 \Omega \cdot \text{cm}$,有源区压降为 3.5V,激光器的工作电流密度取为 $J = 5 \text{ kA/cm}^2$,接近理想值.

图 5 是在两种不同装配形式下,p 电极比接触电阻率的大小对有源区温度升高的影响.由模拟结果可以看出,正装情况下 p 电极层上压降产生的热量导致有源区温度升高的效应远远高于倒装情况下的这种影响.这是由于边界条件采用了绝热近似,在正装情况下,p 电极层的发热不仅没有往外传播,反而从表面反射回来(见图 2(a)),大大提高了有源区的温度.在倒装情况下,由于外延层表面的合金层与热沉接触,这一层产生的热量基本上都传入热沉中,因而对有源区温度影响不大.当然在这里,我们没有考虑在 p 电极接触层上,由金丝引线所带走的热量,这个数目也不小,应做进一步分析.

另外从模拟结果可以看到,p 电极层的比接触电阻率小于 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 后,它对激光器温度特性的影响已经很小,而当比接触电阻率小于 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 后,对有源区温度的增加没有大的影响.实际工作中,应该尽量降低 p 电极层的比接触电阻率到 $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以下.

3.4 功率密度的影响

最初模拟中假设电流密度是 10 kA/cm^2 ,这个

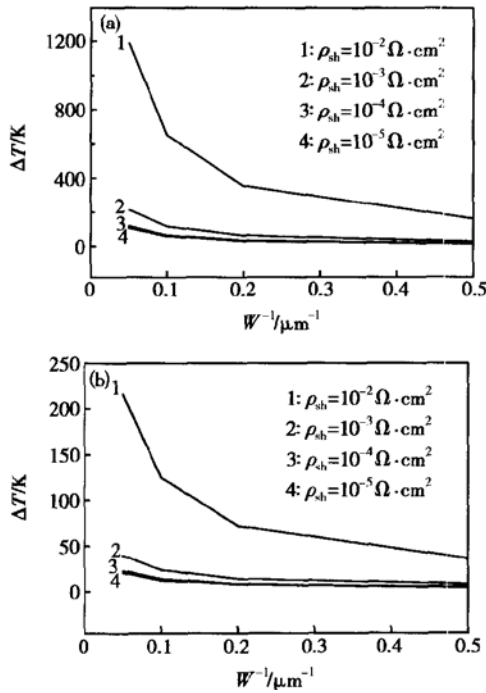


图 5 不同比接触电阻率下有源区的温度升高(相对 300K)和条宽的关系 (a)正装;(b)倒装

Fig. 5 Temperature increase of active region with different p-contact specific resistivities as a function of ridge widths (a) p-up configuration; (b) p-down configuration

条件下激光器的功率密度接近 $100\text{kW}/\text{cm}^2$, 此时在不同条宽、衬底以及装配情况下激光器有源区的温度升高都在 100°C 以上. 如果阈值电流密度为 $250\text{kW}/\text{cm}^2$, 则在某些情况下有源区温度的升高达到上千度, 见图 6(a). 有源区产生的热量太多会导致激光器烧毁, 无法实现室温连续工作. 如果能改进工艺条件和材料质量, 优化设计器件结构, 降低功率密度到 $50\text{kW}/\text{cm}^2$, 则在窄条宽情形, 有源区的温度升高会小于 100°C (见图 6(b)), 从而实现室温下连续工作.

4 结论

利用二维有限元法对 GaN 半导体激光器进行了热模拟. 考虑了激光器结构中的衬底、封装形式、激光器条宽、p-电极层的比接触电阻率以及功率密度对有源区温度的影响. 估计了 GaN 激光器实现室温连续激光的一些条件. 模拟发现: 采用不同衬底和不同装配形式对提高器件的温度特性非常重要; 正

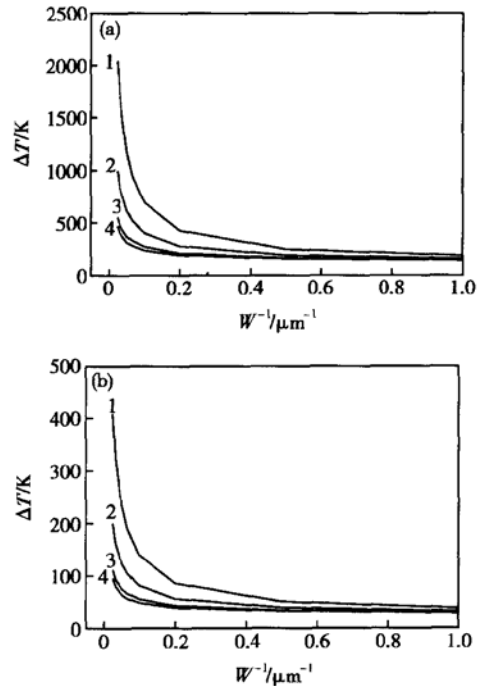


图 6 (a) $250\text{kW}/\text{cm}^2$ 下的温度升高;(b) $50\text{kW}/\text{cm}^2$ 下的温度升高

Fig. 6 Temperature increase of active region with different power densities as a function of ridge widths (a) Power density of $250\text{kW}/\text{cm}^2$; (b) Power density of $50\text{kW}/\text{cm}^2$

装形式下, 窄的脊形条宽能提高器件高温下的工作稳定性, 此外降低 p 电极的比接触电阻率和功率密度也能提高器件的温度特性.

参考文献

- [1] Nakamura S, Senoh M, Nagahama S, et al. High-power, long-lifetime InGaN multi-quantum-well-structure laser diodes. *Jpn J Appl Phys*, 1997, 36: L1059
- [2] Zhang Xiaobo, Gao Dingsan. Transient thermal effects calculation in InP/InGaAsP stripe geometry semiconductor laser diode. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1989, 10(5): 362 (in Chinese) [张海波, 高鼎三. InP/InGaAsP 条形半导体激光器中的瞬态温度特性理论计算. *半导体学报*, 1989, 10(5): 362]
- [3] Piprek J, Nakamura S. Physics of high power InGaN/GaN lasers. *IEE Proc Optoelectron*, 2002, 149(4): 145
- [4] Levinshtein M E, Rumyantsev S L, Shur M S. Properties of advanced semiconductor materials. New York: John Wiley & Sons, INC, 2001
- [5] Hatakoshi G I, Onomura M, Yamamoto M, et al. Thermal analysis for GaN laser diodes. *Jpn J Appl Phys*, 1999, 38(5a): 2764

Thermal Simulation of Ridge-GaN Laser Diode*

Ye Xiaojun, Chong Ming and Chen Lianghai

(*Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

Abstract: Thermal characteristics of GaN lasers are analyzed with a two-dimensional time-independent thermal conduction model. The maximum temperature of active region under continuous operation conditions is also calculated. It shows that different substrates and configurations is important to improve the temperature characteristics of GaN laser diodes.

Key words: semiconductor laser; GaN; thermal simulation; thermal resistance

PACC: 6780G; 7280E; 8220W

Article ID: 0253-4177(2004)12-1680-05

* Project supported by National High Technology Research & Development Program of China(No. 2002AA 31116Z)

Ye Xiaojun male, PhD candidate. He is engaged in the research on development of GaN laser diode.

Received 16 December 2003, revised manuscript received 5 February 2004

©2004 The Chinese Institute of Electronics