

GaN基半导体激光器稳态热分析

李奕霏, 晏长岭*, 杨静航

长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春

收稿日期: 2024年4月22日; 录用日期: 2024年5月20日; 发布日期: 2024年5月29日

摘要

GaN基蓝光半导体激光器逐渐进入人们的视野, 被广泛应用于数据存储、激光显示、光学通信、激光武器等民用和军用领域。本文基于合理可靠的GaN基半导体激光器散热模型, 利用ANSYS有限元分析软件进行稳态工作条件下的热特性模拟仿真。分别研究了AlN、CVD金刚石、SiC以及WCu10四种过渡热沉材料对半导体激光器散热特性的影响。AlN、CVD金刚石、SiC、WCu10四种过渡热沉材料封装对应器件最高温度分别为87.46°C、66.68°C、71.32°C、85.28°C。结果显示, SiC与CVD金刚石材料在降低器件温升方面表现出巨大潜力。

关键词

蓝光半导体激光器, 散热分析, 过渡热沉

Steady-State Thermal Analysis of a GaN-Based Semiconductor Laser

Yifei Li, Changling Yan*, Jinghang Yang

State Key Lab on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Apr. 22nd, 2024; accepted: May 20th, 2024; published: May 29th, 2024

Abstract

GaN-based blue light semiconductor lasers have gradually entered people's field of vision and are widely used in civil and military fields such as data storage, laser display, optical communication, laser weapons, etc. This paper is based on a reasonable and reliable GaN-based semiconductor laser heat dissipation model, and uses ANSYS finite element analysis software to simulate the ther-

*通讯作者。

mal characteristics under steady-state working conditions. We investigated the effects of four transition heat sink materials of AlN, CVD diamond, SiC and WCu10 on the heat dissipation characteristics of semiconductor lasers were studied respectively. The highest temperature of the corresponding devices of AlN, CVD diamond, SiC and WCu10 is 87.46°C, 66.68°C, 71.32°C and 85.28°C, respectively. The results show that SiC and CVD diamond materials have great potential in reducing device temperature rise.

Keywords

Blue Light Semiconductor Laser, Heat Dissipation Analysis, Transition Heat Sink

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

GaN 作为第三代宽带隙半导体材料，其禁带宽度为 3.39 eV，且具有电子迁移率高、化学性质稳定、导热率高和抗辐射等优点，在光电子器件和微波功率器件市场都得到了广泛应用[1]。自 1996 年 NICHIA 公司的 Shuji Nakamura 制作出了世界上第一个在室温条件下连续波工作的蓝光量子阱半导体激光器以来[2]，通过 GaN 材料中电子跃迁实现的蓝光半导体激光器引起了研究人员的广泛关注[3] [4]。GaN 基半导体激光器能够充分发挥其体积小、重量轻和易于集成的优势。近年来，随着 GaN 材料外延技术的发展，GaN 基蓝光半导体激光器输出特性能得到显著的提升，其输出功率已经从 5 mW 提高到了 6 W，能够满足工业生产的实际需求[5] [6]。

随着蓝光半导体激光器的功率增加，蓝光半导体激光器的散热能力和其可靠性也需要不断提升，因此对高功率蓝光半导体激光器的封装散热研究可以拓展其应用市场。国内外众多研究小组分别采用 ansys 有限元分析方法、拉曼热测量技术、封装热阻理论计算方法以及神经网络算法等手段[7]开展了 GaN 大功率器件热特性研究，并且证明 ansys 有限元分析方法具有相对误差小和温度趋势吻合度高等优势。本文从半导体激光器产热分析出发，建立了合理可靠的 GaN 基蓝光半导体激光器稳态热分析模型；结合 ansys 有限元分析软件与传热学基本理论，开展了器件热流矢量分布研究工作，并分析研究了 AlN 陶瓷片、CVD 金刚石、SiC 以及 WCu10 四种过渡热沉材料对器件温升和有源区温度分布的影响。

2. 器件稳态热分析

2.1. 模型建立

半导体激光器件在实际工作中大量的注入电能均转化为废热。半导体激光器芯片的产热机制可简单分为焦耳生热、复合生热、汤姆森生热、光吸收生热四种[8]。通常情况下，以上四种产热机制几乎相伴产生同时存在，不能够将其区分开来。基于上述对热源的简化假设，当器件处于工作状态时，注入电能转化为光能和热能两部分。即：

$$W = P_{out} + Q \quad (1)$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{W} \quad (2)$$

其中, W 为器件工作时注入电能, Q 为器件工作时产生的电能, P_{out} 为器件输出功率, η 为电光转换效率。因此, 在有源区内各发光单元施加均匀的生热率载荷计算公式为:

$$q_i = \frac{Q}{V} = \frac{P_{out} \left(\frac{1-\eta}{\eta} \right)}{N \times d \times S} \quad (3)$$

其中, q_i 为内部生热率, V 为有源区体积, N 为阵列内包含的发光单元个数, d 为有源区厚度, S 为发光单元有源区底面面积。GaN 基蓝光激光器的工作时注入电能 $W \approx 16.3$ W, 出光功率 $P_{out} \approx 4.15$ W, 光转换效率为 $\eta \approx 25.77\%$, 结合芯片的有源区体积, 得到有源区生热率为 6.7×10^9 pW/ μm^3 。

对真实的物理系统进行模拟仿真时, 合理的简化与假设不仅不会影响结果的可靠性, 而且会大大降低其运算求解难度。首先, 通过半导体刻蚀工艺形成的激光器台面是粗糙且有一定角度的(通常为 $\pm 10^\circ$), 理论计算时假设激光器结构为侧壁光滑垂直的理想状态; 其次, 在实际封装工艺中, 与半导体芯片焊接的铜热沉尺寸较大, 理论计算时将铜热沉的尺寸简化为 $1800 \mu\text{m} \times 900 \mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$ 。对热沉大小进行简化为。另外, 假定器件各层材料之间满足温度及热流密度的连续性。建立热分析模型, 其尺寸、热导率等具体参数如表 1 所示。

Table 1. Modeling parameters in ANSYS simulation

表 1. ANSYS 模拟中的建模参数

结构名称	材料组份	尺寸/ μm (长 \times 宽 \times 高)	热导率(W/m·K)
p 型电极层	Ti-Au	$1200 \times 45 \times 0.2$	150
欧姆接触层	p-InGaN	$1200 \times 45 \times 0.04$	190
上限制层	p-AlGaIn/GaN	$1200 \times 45 \times 0.6$	262
电子阻挡层	p-AlGaIn	$1200 \times 300 \times 0.02$	272
上波导层	p-InGaIn	$1200 \times 300 \times 0.1$	257
有源区	InGaIn/GaN	$1200 \times 300 \times 0.033$	258
下波导层	n-InGaIn	$1200 \times 300 \times 0.12$	254
下限制层	n-AlGaIn	$1200 \times 300 \times 1$	265
衬底缓冲层	n-GaN	$1200 \times 300 \times 50$	260
焊料	AuSn	$1200 \times 300 \times 5$	57
n 型电极层	Ti-Au	$1200 \times 600 \times 0.2$	150
过渡热沉	AlN	$1500 \times 600 \times 100$	200
热沉	Cu	$1800 \times 900 \times 600$	398

依据表 1 中的 GaN 基蓝光半导体激光器封装结构模型参数, 在 ansys workbench 中利用 Design Modeler 建模平台自下而上建立简化结构模型[9], 如图 1 所示。并对结构模型进行材料属性定义、网格划分以及边界条件设定, 形成 GaN 基蓝光半导体激光器稳态热分析理论模型。划分网格中设置目标物理环境为 Mechanical, Relevance (相关性)的值为 30, 高级尺寸控制为 Adaptive, 跨度中心角设置为 Medium, 膨胀选项为 Smooth Transition (平滑过渡)。

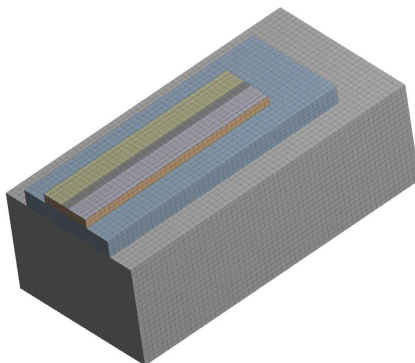


Figure 1. The GaN-based semiconductor laser model

图 1. GaN 基半导体激光器模型图

2.2. 结果与讨论

首先，对 GaN 基半导体激光器半进行热流量密度模拟仿真，如图 2 所示。图 2 中红色箭头为最大热流矢量即芯片与热沉热传导散热热流量，最大热流量为 $1.59 \times 10^8 \text{ pW}/\mu\text{m}^2$ 。蓝色箭头为最小热流矢量最小热流量为 $6.35 \times 10^3 \text{ pW}/\mu\text{m}^2$ 。芯片热源的散热方式主要有与空气间热对流交换散热和与热沉间热传导散热两种。其中，起重要作用的是通过向下和向两侧传导到热沉的热传导散热模式。对于一维热传导模型，即假设热量在沿一维 x 方向上以热传导的形式传递。存在热源的封闭热传导系统的稳态热传导微分方程可以表示为[10]：

$$\nabla^2 T + \frac{q_i}{\lambda} = 0 \tag{4}$$

其中， T 为温度分布、 q_i 为热源生热率、 λ 为材料热导率。由此可知，存在热源的封闭热传导系统温度稳定分布情况只受到热导率 λ 与热源生热率 q_i 的影响，与热导率 λ 成反比，与热源生热率 q_i 成正比，与比热容等其它因素无关。为此，探究高热导率材料作为半导体激光器的过渡热沉辅助散热，能大大降低半导体激光器的工作温度，提高半导体激光器的输出稳定性。

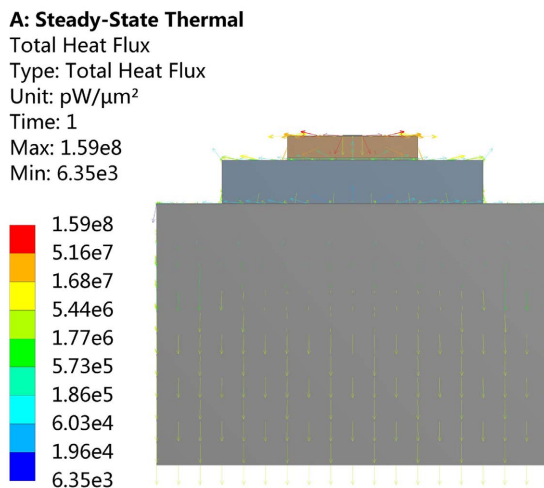


Figure 2. Heat flux vector diagram of the GaN-based semiconductor laser

图 2. GaN 基半导体激光器热流矢量图

添加高热导率的过渡热沉是基于热沉冷却散热封装的一种常用手段。常用的过渡热沉材料及其特性参数如表 2 所示。AlN 与 WCu10 是传统的过渡热沉材料, 两者均具有较高的热导率与较低的热膨胀系数, 被广泛应用于光电子器件与大规模集成电路。SiC 陶瓷散热片具备良好的散热能力、较低的热膨胀系数以及良好的可靠性, 目前正在成为热门的新型散热材料。CVD 金刚石是采用化学气相沉积法制备的金刚石, 物理化学性质基本与天然金刚石相同, 其热导率最高可以达到 1800 W/m·K, 有巨大潜力成为新型散热材料。

Table 2. Transition heat-sink materials and their characteristic parameters
表 2. 过渡热沉材料及其特性参数

材料	密度/ (g/cm ³)	热膨胀系数/ (K ⁻¹)	弹性模量/ (GPa)	泊松比	热导率/ (W/m·K)
AlN	3.3	4.1×10^{-6}	270	0.26	200
WCu10	16.75	6.2×10^{-6}	315	0.3	160
CVD 金刚石	3.52	1.0×10^{-6}	87	0.25	1000
SiC	3.22	3.9×10^{-6}	221	0.21	490

在理论计算中, 单一变量为过渡热沉材料, 其他参数及结构完全一致。对建立的模型进行理论计算不同过渡热沉材料的 GaN 基半导体激光器热分布云图如图 3 所示。由于相同封装结构相同, 不同过渡热沉材料的 GaN 基半导体激光器温度色块分布相似, 器件最高温度(即图 3 中红色色块部分)主要集中在上腔面附近。过渡热沉为 AlN 陶瓷片时器件最高温度为 87.46°C, 温升为 65.46°C; 过渡热沉 CVD 金刚石时器件最高温度为 66.68°C, 温升为 44.68°C; 过渡热沉为 SiC 时器件最高温度为 71.31°C, 温升为 49.32°C; 过渡热沉为 WCu10 时器件最高温度为 85.28°C, 温升为 63.23°C。相比较而言, 由于 CVD 金刚石材料的高导热率特性, CVD 金刚石过渡热沉在降低器件温度方面表现处独特优势与巨大潜力; AlN 陶瓷片与 SiC 过渡热沉材料的热导率特性良好, 两者都能够起到降低器件的工作温度的作用; WCu10 过渡热沉材料热导率为 160 W/m·K, 显著低于其他几种过渡热沉材料热导率, 故 WCu10 过渡热沉材料在降低器件温度方面优势不是十分显著。

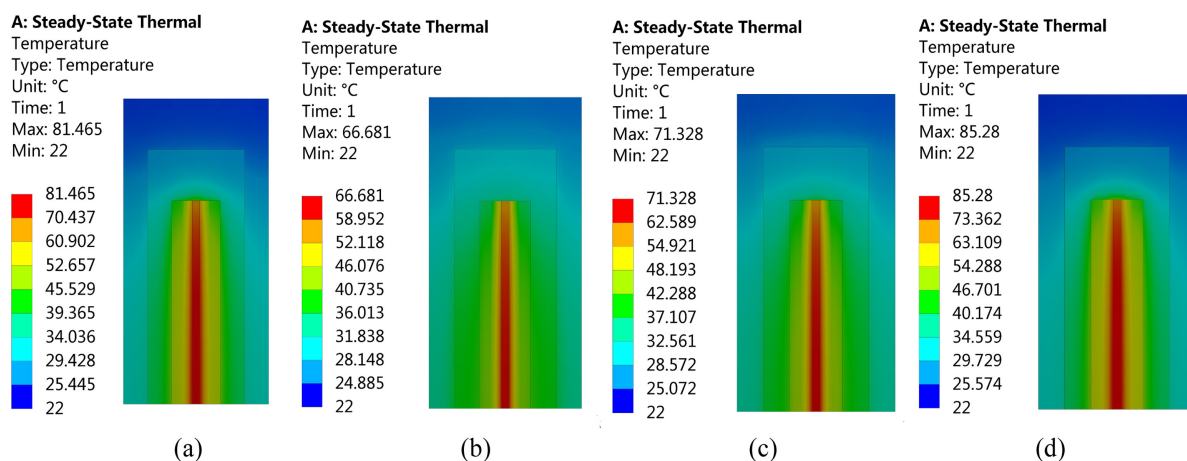


Figure 3. Steady state distribution of GaN-based semiconductor laser with different transition heat sink materials (a) AlN; (b) CVD diamond; (c) SiC; (d) WCu10

图 3. 不同过渡热沉材料 GaN 基半导体激光器稳态分布图(a) AlN; (b) CVD 金刚石; (c) SiC; (d) WCu10

工作中进一步分析了不同过渡热沉材料下, GaN 基半导体激光器芯片有源区的温度分布, 如图 4 所示。不同过渡热沉材料的芯片有源区温度分布趋势相同, 芯片有源区主要集中在 $-22.5\ \mu\text{m}\sim 22.5\ \mu\text{m}$ 的产热部分, 并向两侧进行热传导散热。AlN 过渡热沉、CVD 金刚石过渡热沉、SiC 过渡热沉以及 WCu10 过渡热沉封装的芯片有源区最高温度分别为 77.87°C 、 62.98°C 、 67.53°C 以及 81.13°C ; AlN、CVD 金刚石、SiC 以及 WCu10 过渡热沉封装的芯片有源区最低温度分别为 51.53°C 、 41.26°C 、 44.15°C 以及 54.68°C 。显然, SiC 材料与 CVD 金刚石材料对芯片有源区的散热作用明显优于 AlN 材料与 CVD 金刚石材料。

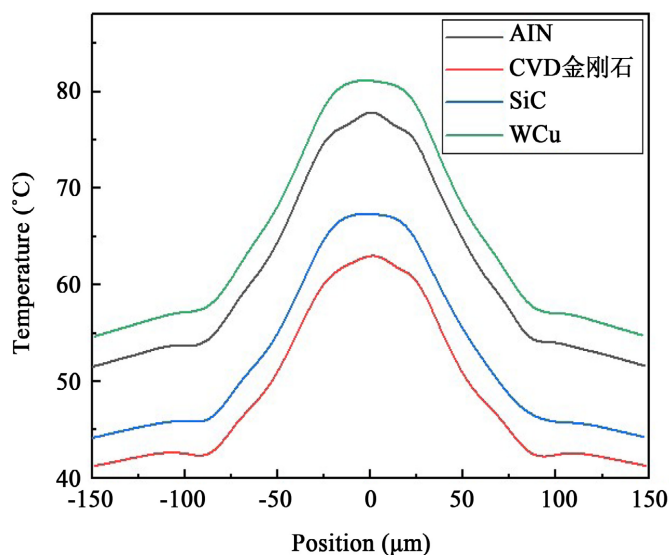


Figure 4. Comparison of temperature distribution in the active region of the GaN-based semiconductor laser

图 4. 不同过渡热沉材料 GaN 基半导体激光器有源区温度分布对比图

3. 结论

本文采用 ANSYS 有限元分析软件建立了 GaN 基蓝光半导体激光器物理仿真模型, 并研究其热流矢量分布特性; 在稳态条件下, 分析了 AlN 陶瓷片、CVD 金刚石、SiC 和 WCu10 四种不同过渡热沉材料对器件最高温度与有源区热分布的影响。AlN 陶瓷片、CVD 金刚石、SiC、WCu10 四种过渡热沉材料封装对应器件最高温度分别为 87.46°C 、 66.68°C 、 71.32°C 、 85.28°C 。采用 CVD 金刚石与 SiC 过渡热沉材料封装能够获得较为理想的散热效果, 为 GaN 基大功率光电子器件散热封装技术提供理论依据。

基金项目

吉林省科技厅项目(20220101122JC); 吉林省科技发展计划项目(20240302020GX)。

参考文献

- [1] 张晓倩. GaN 基 HEMT 性能研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2014.
- [2] Nakamura, S., Senoh, M., Nagahama, S.I., *et al.* (1996) In Ga N-Based Multi-Quantum-Well-Structure Laser Diodes. *Japanese Journal of Applied Physics*, **35**, L74-L76. <https://doi.org/10.1143/JJAP.35.L74>
- [3] 李方直, 胡磊, 田爱琴, 等. GaN 基蓝绿光激光器发展现状与未来发展趋势[J]. 人工晶体学报, 2020, 49(11): 1996-2012.
- [4] 张洋, 徐鹏. GaN 基激光器的研究进展[J]. 上海有色金属, 2020, 41(1): 54-60.

-
- [5] Hara, T., Sato, Y., Higashino, R., *et al.* (2020) Pure Copper Layer Formation on Pure Copper Substrate Using Multi-Beam Laser Cladding System with Blue Diode Lasers. *Applied Physics A*, **126**, 23-28. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03559-6>
- [6] Partovi, A., Peale, D., Wuttig, M., *et al.* (1999) High-Power Laser Light Source for Near-Field Optics and Its Application to High-Density Optical Data Storage. *Applied Physics Letters*, **75**, 1515-1517. <https://doi.org/10.1063/1.124740>
- [7] 豆保亮. 基于神经网络的 GaN 功率器件封装体热性能优化研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2024.
- [8] 何永勃, 杨伟, 范广永, 张文杰. 基于速率方程的半导体激光器温度特性研究[J]. *应用激光*, 2019, 39(5): 880-885.
- [9] 程小劲. Ansys Workbench 在固体激光器设计中的应用[J]. *科技资讯*, 2018, 16(3): 67-69.
- [10] 杨世铭, 陶文铨. *传热学*[M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 33-146.