

DOI:10.16136/j.joel.2022.12.0094

基于高导热率石墨膜的 GaN 半桥功率器封装散热研究

寇玉霞^{1,2}, 张旭¹, 袁芳¹, 郭玉洁^{1,2}, 常育宽^{1,2}, 陈弘达^{1*}

(1. 中国科学院半导体研究所 光电子研究发展中心, 北京 100083; 2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘要: 本文针对激光雷达转镜扫描电机对调速精度、频率和运动幅度的需求, 提出了一种基于高导热率石墨膜的 GaN 半桥功率器封装方案。仿真结果表明, 与环氧玻璃布层压板(FR-4)基板、FR-4 基板+铜散热片、陶瓷基板三种散热结构相比, 采用 FR-4 基板+导热石墨膜散热结构的 GaN 半桥功率器, 制备成本较低、工艺复杂度可控、成品质量轻、散热性能好, 最高可降温 32.6 °C, 散热性能可提升 29.6%。导热底部填充胶起到热耦合作用, 在石墨膜封装结构中不可或缺。换热系数可影响散热性能, 在其他散热影响因素无法再优化情况下, 可通过增加换热系数提高散热效果。本文研究结果对高频、高功率密度、小尺寸功率器件封装热设计具有一定的参考和指导意义。

关键词: 激光雷达; GaN 半桥功率器; 导热石墨膜; 底部填充胶; 散热性能

中图分类号: TN492 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)12-1248-07

Research on heat dissipation of GaN half-bridge power device package based on high thermal conductivity graphite film

KOU Yuxia^{1,2}, ZHANG Xu¹, YUAN Fang¹, GUO Yujie¹, CHANG Yukuan¹, CHEN Hongda^{1*}

(1. Optoelectronics Research and Development Center, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In this paper, a GaN half-bridge power device packaging scheme based on high thermal conductivity graphite film is proposed to meet the requirements of the speed regulation accuracy, frequency and motion amplitude of the lidar rotating mirror scanning motor. The simulation results show that, compared with the three heat dissipation structures of FR-4 substrate, FR-4 substrate with copper heat sink, and ceramic substrate, the GaN half-bridge power device using the FR-4 substrate with thermally conductive graphite film heat dissipation structure has the characteristics of low preparation cost, controllable process complexity, light weight of finished product and good heat dissipation performance whose maximum temperature reduction is 32.6 °C, and heat dissipation performance can be improved by 29.6%. Thermally conductive underfill acts as thermal coupling and is indispensable in graphite film packaging structures. The heat transfer coefficient can affect the heat dissipation performance. When other heat dissipation influencing factors cannot be optimized, the heat dissipation effect can be improved by increasing the heat transfer coefficient. The research results in this paper have certain reference and guiding significance for the thermal design of high frequency, high power density and small size power device packaging.

Key words: lidar; GaN half-bridge power device; thermally conductive graphite film; underfill; dissipation performance

* E-mail: hdchen@semi.ac.cn

收稿日期: 2022-02-20 修订日期: 2022-03-25

1 引言

激光雷达技术可实时感知周边环境构建三维图景,为行驶中的汽车提供准确的驾驶信息及可靠的安全保障,因此成为未来无人驾驶汽车的重要基础性技术^[1]。激光雷达是一款光机电一体化产品,需光电子、微电子、机械等多学科深度融合。扫描式激光雷达系统架构中,扫描电机作为动力源,负责带动微转镜实现激光束对外界的精准扫描,是系统的重要组成部分。设计高速高功率的电机驱动电路对扫描电机进行高精度的调速控制,是提高系统扫描精度、扫描频率和运动幅度的保证。为满足系统对扫描速度和调速精度的需求,扫描式激光雷达常采用半桥式功率器驱动直流无刷电机^[2,3]。在半桥功率器设计中,传统的硅基半导体功率器件难以满足上述高频调速应用的需求,而具有高开关频率、高功率密度、低导通电阻等优点的氮化镓高电子迁移率晶体管(gallium nitride high electron mobility transistors, GaN HEMT)则展现出了极佳的技术匹配度和良好的应用前景^[4]。

GaN 半桥功率器将上下桥 GaN HEMT 器件与硅基半桥栅极驱动芯片在同一封装体内实现异构混合集成,与传统分立式器件相比,系统集成度高,器件间电感、电阻、电容等寄生参数小,易实现更高的功率密度和工作频率^[5,6],非常适合在扫描式激光雷达高速高精度电机调速场景中应用。然而,由于 GaN 半桥功率器体积小、功率密度高,在高频大电流负载工作条件下的器件温度升高会导致导通电阻增大,并影响高频性能以及器件可靠性^[7],因此,研究 GaN 半桥功率器的散热方法,改善其散热性能显得尤为重要。

通过基板散热是小体积功率器件封装体的主要散热机制,传统的环氧玻璃布层压板(FR-4)的导热系数为 $0.3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,而陶瓷基板的导热系数更高,如氮化铝(aluminum nitride, AlN)基板的导热系数可达 $200 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 左右^[8]。文献[9]中利用 AlN 材料陶瓷基板设计了 GaN 功率模块双面散热结构,与传统单面散热模块相比,其散热性能提高了 28%—40%。但陶瓷基板尤其是 AlN,成本较高,机械性能略差,实施多层布线的难度较大,在小尺寸多芯片封装中受限较大。另外,文献[10]将铜(copper, Cu)散热片嵌入封装

体,虽然实现了较优的散热性能,但需在芯片与铜散热片间设计附加的缓冲层以实现应力匹配,增加了工艺复杂度和封装体的质量。

因此,本文针对激光雷达扫描电机对 GaN 半桥功率器的需求,提出一种基于高热导率石墨膜的新型散热方案,利用石墨膜在水平面内具有超高的热导率^[11]的特性,实现器件的快速散热。本文构建了不同结构的器件模型,并进行了热仿真分析,验证了使用石墨膜散热结构的性能优势。并针对使用石墨膜散热的器件封装结构,分析了石墨膜导热系数、换热系数、底部填充胶导热系数及 GaN HEMT 器件相对位置对散热的影响。此封装方案成本较低、工艺复杂度可控、成品质量轻、散热性能好,可作为同类小尺寸功率器件封装热设计的参考与指导。

2 结构与建模

2.1 电路原理与封装结构

本文以 GaN 半桥功率器为研究对象,其驱动直流无刷电机的原理图如图 1 所示,以 HI_U 和 LI_V 输入信号同时为高的状态为例,此时 NM1、NM4 导通,电流由 GaN HEMT 器件 NM1 经等效电感 L1 流向 GaN HEMT 器件 NM4,扫描电机转动。通过驱动逻辑电路产生驱动信号统一控制 GaN HEMT 器件导通顺序,可实现直流无刷电机的连续运转^[12]。

为满足扫描电机高扫描精度、高扫描频率的需求, GaN 半桥功率器工作在高频大电流负载条件下,此时散热为影响性能的关键因素。

为提高 GaN 半桥功率器的高频性能,在封装设计时要考虑寄生参数的影响,同时结合原理图,本文设计的 GaN 半桥功率器封装结构的示意图如图 2 所示。其中驱动芯片模型来自于德州仪器(Texas Instruments, TI)公司的 LM5113 芯片,其封装形式为 DSBGA 封装,封装电感很低^[13],两个 GaN HEMT 器件模型均为宜普电源转换(Efficient Power Conversion, EPC)公司的 EPC2015C,为耐压 40 V、导通电阻 $4 \text{ m}\Omega$ 、电流 53 A 的晶体管^[14]。

为最小化驱动芯片与基板、GaN 与基板、驱动芯片与 GaN 之间的寄生电感,如图 2(a)侧视图所示,驱动芯片和 GaN HEMT 器件以倒装方式安装在基板上,驱动芯片、GaN HEMT 器件与基板间通过锡球连接;如图 2(b)俯视图所示,驱动芯片和 GaN HEMT 器件之间连线再通过基板内部走线实现。

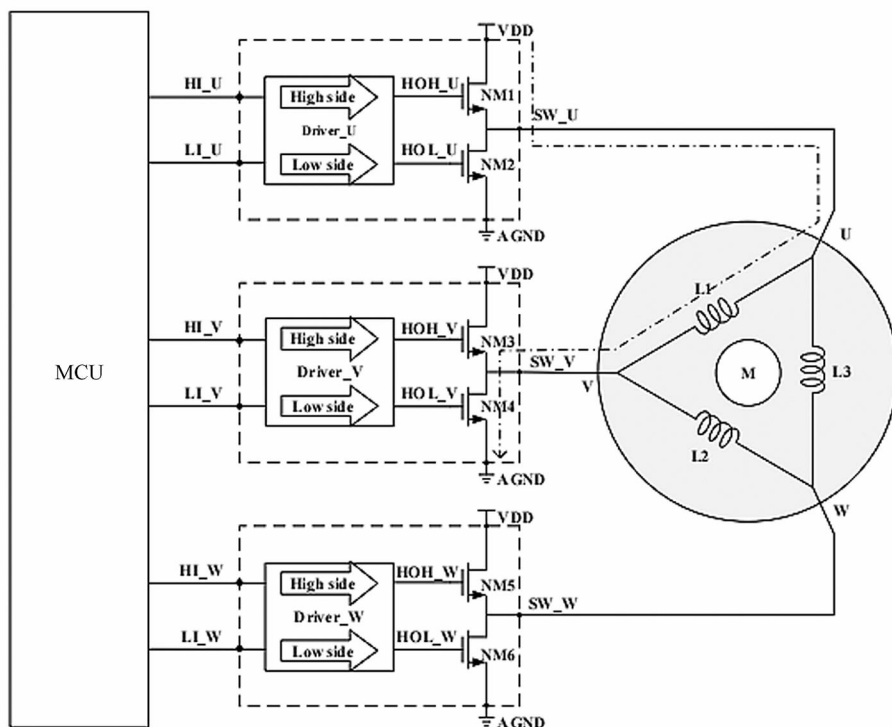


图1 GaN 半桥功率器驱动直流无刷电机原理图

Fig. 1 Schematic diagram of brushless DC motor driven by GaN half-bridge power device

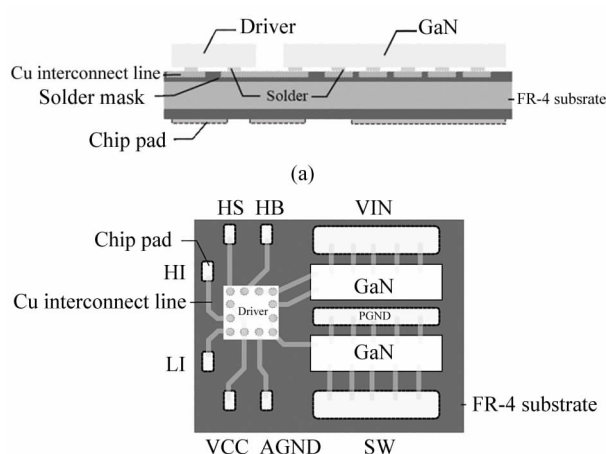


图2 GaN 半桥功率器封装结构示意图:

(a) 侧视图; (b) 俯视图

Fig. 2 Schematic diagram of package structure of GaN half-bridge power device:

(a) Lateral view; (b) Top view

2.2 建模与仿真

2.2.1 模型建立

本文主要研究使用导热石墨膜后 GaN 半桥功率器的散热性能,如图 3 所示为贴装石墨膜封装结构的仿真模型及尺寸信息。如图所示,底部为 FR-4 基板,基板上焊有通过倒装焊方式沉积的锡球,LM5113 与两个 GaN HEMT 器件正面朝下通过锡

球与基板相连,另外,为降低焊点上的应力同时提高锡球热疲劳寿命,芯片与基板之间的缝隙填充底部填充胶^[15],在本结构中,底部填充胶可进行热耦合,将器件产生热量传递到石墨膜上。

封装基板的尺寸为 $8\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 0.06\text{ mm}$,石墨膜通过背胶贴在基板上,厚度为 0.04 mm ,为避免芯片短路,石墨膜不能与底部焊球相连,基板上的石墨膜在驱动芯片及 GaN 处为镂空状态。LM5113 驱动芯片仿真模型尺寸为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$,驱动芯片与基板间的锡球直径为 0.18 mm ,高度为 0.01 mm ,底部填充胶填充芯片与基板间空隙,外围尺寸为 $2.2\text{ mm} \times 2.2\text{ mm} \times 0.05\text{ mm}$; GaN HEMT 器件仿真模型的尺寸为 $4.1\text{ mm} \times 1.6\text{ mm} \times 0.685\text{ mm}$,与基板间的焊锡的尺寸为 $0.2\text{ mm} \times 1.4\text{ mm} \times 0.01\text{ mm}$,底部填充胶外围尺寸为 $4.3\text{ mm} \times 1.87\text{ mm} \times 0.05\text{ mm}$ 。

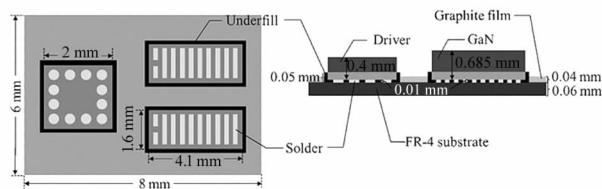


图3 贴装石墨膜封装结构的仿真模型

Fig. 3 Simulation model of mounted graphite film package structure

2.2.2 仿真条件

驱动芯片以及 GaN HEMT 器件在工作过程中会产生大量的热量,热量的传递过程包括导热、对流以及辐射,在本模型中,主要考虑导热及对流两种方式。

其中导热现象遵循傅里叶定律,其数学表达式为:

$$-\nabla \cdot (k \cdot \nabla T) = Q, \quad (1)$$

式中, Q 为热源,为单位时间单位体积内产生的热能, W/m^3 , k 为导热系数,可以评估材料导热性能的优劣, $W/(m \cdot K)$, T 为绝对温度, $^{\circ}C$ 。热对流指的是流体中质点发生相对位移而引起的热量传递过程,在对流换热过程中传递的热量遵循牛顿冷却方程,表达式为:

$$\varphi = h_c A (t_w - t_f), \quad (2)$$

式中, φ 为热量, W , h_c 为传热系数,表示单位面积上温差为 $1^{\circ}C$ 时传递的热量, $W/(m^2 \cdot K)$, A 为换热面积, m^2 , t_w 为固体温度, t_f 为流体温度, $^{\circ}C$ 。

本文对固体传热有限元模型仿真做出如下假设:

- 1) 假设基板及其上贴装的石墨膜平整无翘曲,焊球无空洞等缺陷且焊接良好;
- 2) 忽略石墨膜与基板间背胶层,不考虑其厚度及导热系数的影响,其余导热系数均来自材料;
- 3) 本仿真在自然对流条件下进行,设定传热系数为 $50 W/(m^2 \cdot K)$,外界温度设为 $20^{\circ}C$;
- 4) 为保证结果更具有普适性,考虑两个 GaN HEMT 器件同时工作的情况。假设驱动芯片功耗为 $1 W$,两个 GaN HEMT 器件工作条件相同,功耗均为 $2 W$ 。

表 1 给出了仿真模型中各部分材料的导热系数。

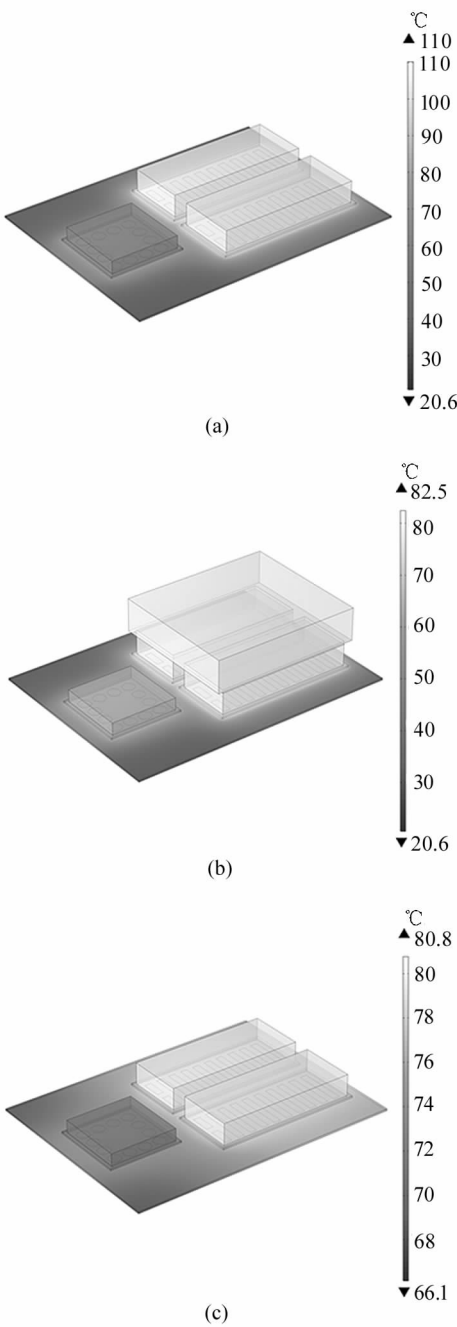
表 1 仿真模型各材料导热系数
Tab.1 Thermal conductivity of each material
in simulation model

Material	Thermal conductivity/ [$W/(m \cdot K)$]
FR-4 substrate	0.3
Solder	70
Underfill	1.6
GaN	130
LM5113	130
Graphite film	$x, y=1500; z=15$

3 仿真结果

3.1 石墨膜对散热影响

本文采用的散热方式为利用石墨膜各向异性及 x, y 平面上高导热系数的特性,将芯片上产生的热量传递到石墨膜上,将点热源转化为面热源,增加了换热面积,单位时间内通过换热面积的热量增加使散热性能大大增强。如图 4 所示,仿真对比了相同条件下初始封装结构、使用 Cu 散热片封装结构、使用氧化铝(aluminum oxide, Al_2O_3)陶瓷基板封装结构、使用石墨膜封装结构的散热性能。



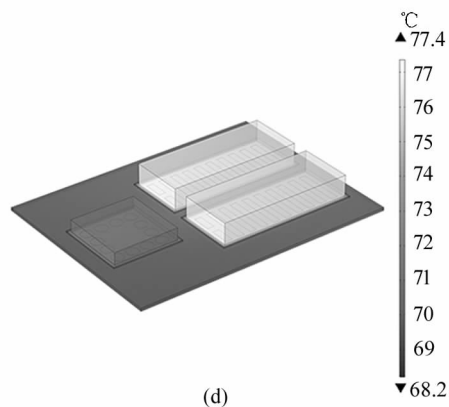


图 4 不同封装结构散热情况的仿真结果:

- (a) 初始封装结构; (b) 使用 Cu 散热片的封装结构;
(c) 使用陶瓷基板的封装结构; (d) 使用石墨膜的封装结构
- Fig. 4 (a) Simulation results of heat dissipation of different package structures; (a) Initial package structure;
(b) Package structure using Cu heat sink;
(c) Package structure using ceramic substrate;
(d) Package structure using graphite film

其中,使用 Cu 散热片的封装结构在初始封装结构基础上,在 GaN 功率器件上覆盖有 $4.5\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ 的 Cu 散热片,散热片与 GaN 间通过导热胶相连。使用陶瓷基板与初始封装结构相比,将基板材料由 FR-4 基板换为陶瓷基板,陶瓷基板导热系数较高,具有优异的散热性能。市面上常用陶瓷基板有 Al_2O_3 、AlN、氮化硅(silicon nitride, Si_3N_4) 3 种,其中, Al_2O_3 陶瓷基板加工工艺较为成熟,且成本较低^[16],故本文选用 Al_2O_3 陶瓷基板。

表 2 给出了使用 Cu 散热片封装结构、使用 Al_2O_3 陶瓷基板封装结构与使用石墨膜封装结构中不同材料的导热系数。

表 3 为不同散热结构散热效果的汇总,其中初始封装结构无外加散热条件,作为参照组。

由仿真结果可知,从散热性能方面,使用石墨膜的封装结构散热性能最好,与初始封装结构相比,温度降低 $32.6\text{ }^\circ\text{C}$,散热效果提升 29.6% ;同时,与使用 Cu 散热片的封装结构、使用 Al_2O_3 陶瓷基板的封装结构相比,具有制备工艺简单、封装体体积、质量较小、无应力失配问题、成本低等优点。

表 2 不同封装结构材料的导热系数
Tab. 2 Thermal conductivity of different package structure materials

Material	Thermal conductivity/ [W/(m · K)]
Cu heat sink	400
Thermal paste	70
Al_2O_3 substrate	25

表 3 不同封装结构的散热效果
Tab. 3 Heat dissipation of different package structures

Package structure	Max temperature/ $^\circ\text{C}$	Increase value/%
Initial package structure	110	/
Package structure using Cu heat sink	82.5	25
Package structure using ceramic substrate	80.8	26.5
Package structure using graphite film	77.4	29.6

3.2 底部填充胶对石墨膜封装结构散热的影响

在本文研究的石墨膜散热模型中,底部填充胶起到了热耦合的作用,它可将驱动芯片及 GaN HEMT 器件上的热量传导至石墨膜上,进而降低器件温度。图 5 为在石墨膜散热结构不使用底部填充胶时封装结构的温度分布情况。结果显示:此时最高温度达 $95.4\text{ }^\circ\text{C}$,相较于使用导热系数为 $1.6\text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 的底部填充胶时温度升高 $18\text{ }^\circ\text{C}$,散热性能下降 18.8% 。

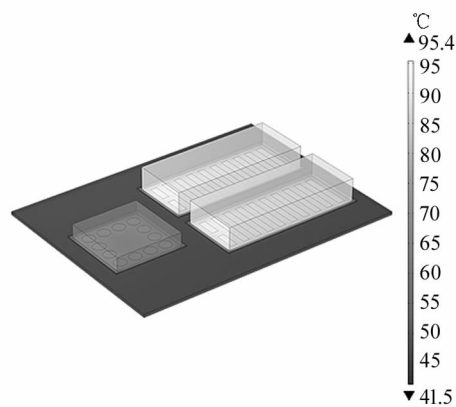


图 5 无底部填充胶时的散热情况
Fig. 5 Heat dissipation without underfill

如图 6 所示为温度随底部填充胶导热系数的变化情况。仿真结果显示,当底部填充胶从无到有时, GaN 温度下降最快,当底部填充胶导热系数从 $1\text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 增大到 $10\text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 的过程中,温度下降趋势逐渐变缓。当没有底部填充胶时,驱动芯片及

GaN HEMT 上的热量通过热辐射的方式传递到石墨膜及周围环境中,散热效率低;填充底部填充胶后,其导热系数越高,热量传递效率越高,散热效果越好。

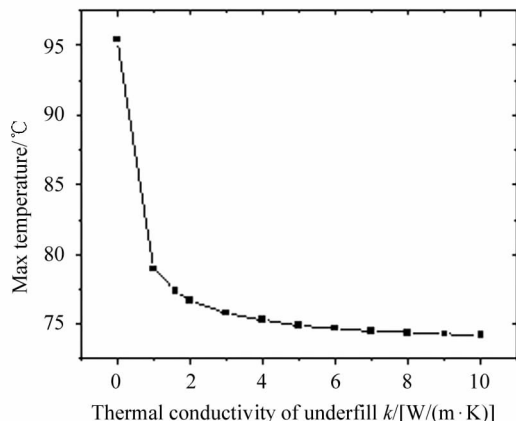


图6 温度随底部填充胶导热系数变化情况

Fig. 6 Variation of temperature with thermal conductivity of underfill

3.3 换热系数对石墨膜封装结构散热的影响

在石墨膜封装结构中,石墨膜接受来自器件的热量,增大了热交换的面积,此时换热系数也会影响散热效果。利用此模型进行热仿真,换热系数与封装结构最高温度的关系如图7所示。从图中可以看出,当换热系数在初始增加阶段,封装结构最高工作温度下降较快;当换热系数在 $90 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 以上时,下降速度变缓,此时换热系数的增加对散热效果的改善不大。因此,在散热过程中,改变其他散热影响因素无法有效降低温度时,可通过适当增大换热系数,如增加流体流速等方法加强散热。

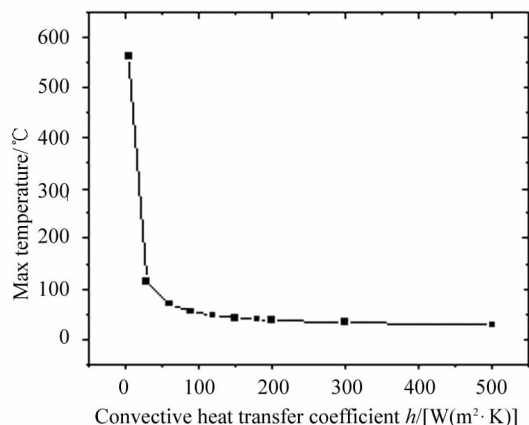


图7 换热系数与封装结构最高温度关系图

Fig. 7 The relationship between the heat transfer coefficient and the maximum temperature of the package structure

4 结 论

本文针对激光雷达扫描电机高速驱动应用,研究了 GaN 半桥功率器封装结构与散热优化方案,基于导热石墨膜提出了一种新型散热方案,与其他散热结构相比,使用导热石墨膜在制备流程简便、封装结构质量轻、成本低的优点基础上,表现出优秀的散热性能,与无散热条件结构相比,可降温 32.6°C ,散热性能提升 29.6% 。另外,导热底部填充胶在石墨膜散热模型中起到热耦合作用,在封装结构中不可或缺;最后,换热系数可影响散热性能,在其他散热影响因素无法再优化的情况下,可考虑增加换热系数提高散热效果。本文研究结果可作为同类高频、高功率密度、小尺寸功率器件封装热设计的参考与指导。

参考文献:

- [1] URMILA O, MEGALINGAM R K. Processing of LiDAR for traffic scene perception of autonomous vehicles[C]//2020 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSPP), July 28-30, 2020, Chennai, India. New York: IEEE, 2020: 298-301.
- [2] DONG S J. Design and experimental research of vehicle lidar system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017: 15-19.
董士军. 车载激光雷达系统设计与实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017: 15-19.
- [3] PAN Y Y. Research and application of scanning control system for rotary single-line LiDARs[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2021: 42.
潘彦宇. 旋转式单线激光雷达扫描控制与应用研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021: 42.
- [4] LIAN G. The pros and cons of GaN family of materials compared with other alternatives regarding optoelectronic applications[C]//2020 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEAA), September 25-27, 2020, Hefei, China. New York: IEEE, 2020: 149-152.
- [5] ONIKIENKO Y, VLASYUK A, MARCHENKO O, et al. High frequency half-bridge GaN-based pulse generator[C]//2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), April 16-18, 2019, Kyiv, Ukraine. New York: IEEE, 2019: 700-703.
- [6] LI X D, GEENS K, GUO W M, et al. Demonstration of GaN integrated half-bridge with on-chip drivers on 200 mm engineered substrates[J]. IEEE Electron Device Letters,

- 2019, 40(9):1499-1502.
- [7] WANG K P, LI B Y, QI Z Y, et al. Evaluation of frequency-dependent on-resistance of GaN devices at high frequency[C]//2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019-ECCE Asia), May 27-30, 2019, Busan, Korea (South). New York: IEEE, 2019:2153-2157.
- [8] MATSUMAE T, KURASHIMA Y, TAKAGI H, et al. Room-temperature bonding of AlN ceramic and Si semiconductor substrates for improved thermal management[C]//2021 International Conference on Electronics Packaging (ICEP), May 12-14, 2021, Tokyo, Japan. New York: IEEE, 2021:5-6.
- [9] LI B Y, WANG K P, ZHU H K, et al. A double-sided cooling GaN power module with high thermal performance[C]//2020 IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia), November 29-December 2, 2020, Nanjing, China. New York: IEEE, 2020:2167-2172.
- [10] SUNDARAM V, DEPROSPO B, GEZGIN N, et al. Integrated copper heat slugs and EMI shields in panel laminate (LFO) and glass fanout (GFO) packages for high power RF ICs[C]//IEEE Electronic Components & Technology Conference (ECTC), May 30-June 2, Orlando, FL, USA, 2017. New York: IEEE, 2017:300-305.
- [11] CERMAK M, BAHRAMI M, KENNA J. Natural graphite sheet heat sinks: a review of the material properties, benefits, and challenges[C]//2018 34th Thermal Measurement, Modeling and Management Symposium (SEMI-THERM), March 19-23, 2018, San Jose, CA, USA. New York: IEEE, 2018:55-62.
- [12] ZHONG W Z, LIU Y T, MAO X R, et al. Analysis of speed control based on CPLD DC brushless motor drive system[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2021, 49(1):7-12.
仲伟正, 刘曰涛, 毛薪然, 等. 基于 CPLD 直流无刷电机驱动系统的调速控制分析[J]. 机床与液压, 2021, 49(1):7-12.
- [13] Texas Instruments. LM5113-Q1 automotive 90-V, 1.2-A, 5-A, half bridge GaN driver [EB/OL]. (2019-11-04) [2022-02-20]. <http://www.ti.com/product/cn/LM5113-Q1>.
- [14] EPC. EPC2015C - Enhancement mode power transistor. [EB/OL]. (2021-04) [2022-02-20]. <https://epc-co.com/epc/Products/eGaNfETsandICs/EPC2015C.aspx>.
- [15] ZHAO G L, WU H Y, YANG Y Y, et al. Underfill filler settling effect on the adhesive force of flip chip packages[C]//2021 22nd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), September 14-17, 2021, Xiamen, China. New York: IEEE, 2021:1-5.
- [16] YANG N, ZHANG H G, XIE J X, et al. Study on thermal characteristics of power module with double-sided cooling package[J]. China Light & Lighting, 2021(2):6-13+24.
杨宁, 詹洪桂, 谢健兴, 等. 大功率模块双面散热封装热设计与特性研究[J]. 中国照明电器, 2021(2):6-13+24.

作者简介:

陈弘达 (1960—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电子与微电子集成器件、集成电路与系统方面的研究。