

# SiC MOSFET 多孔射流强迫风冷方案设计与分析

巩飞, 郭鸿浩, 刘泽远

南京邮电大学自动化学院 江苏南京

**【摘要】**针对 SiC MOSFET 器件的温升问题, 提出了多孔射流的强迫风冷散热方案, 采用 ANSYS ICEPAK 仿真分析了不同风冷方案下的散热性能表现。研究表明, 底部多孔射流方案设计可以实现更低的芯片温度与更优的温度分布均匀性; 针对 SiC MOSFET 器件的直接射流方案设计, 射流冷却与散热器有效面积的下降形成了相互抵消作用, 其实际散热效果不及预期; 综合考虑风口布局与散热器结构特征, 进而改善散热器气流分布是风冷方案设计的重点, 单纯的射流冷却并非最优选择。研究工作为高功率开关器件的热管理设计提供了参考依据。

**【关键词】** SiC MOSFET; 强迫风冷; 射流冷却; 散热器

**【收稿日期】** 2026 年 2 月 15 日

**【出刊日期】** 2026 年 3 月 17 日

**【DOI】** 10.12208/j.jeea.20260004

## Design and analysis of forced air-cooling scheme based on porous jets for SiC MOSFET

Fei Gong, Honghao Guo, Zeyuan Liu

College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunication, Nanjing, Jiangsu

**【Abstract】** Aiming at the temperature rise problem of SiC MOSFET devices, one kind of forced air-cooling scheme based on porous jets was proposed. The thermal performance of different air-cooling schemes was analyzed using ANSYS ICEPAK simulation. The research results show that the bottom porous jet scheme design can achieve lower chip temperatures and better temperature uniformity distribution. For the top direct jet scheme design of SiC MOSFET devices, the jet cooling and the reduction in the effective area of the heatsink form a mutually counteracting effect, and its actual cooling effect is not as expected. The key point in the design of the air-cooling scheme is to comprehensively consider the layout of the air outlet and the structural characteristics of the heatsink, and then improve the airflow distribution around the heatsink. Pure jet cooling is not the best choice. The research work provides a reference basis for the thermal management design of high-power switching devices.

**【Keywords】** SiC MOSFET; Forced air-cooling; Jet cooling; Heatsink

### 1 引言

随着现代电力电子技术的快速发展以及设备功率密度的不断提高, 具备优良的物理和电气性能的宽禁带 SiC MOSFET 广泛应用于电动汽车、新能源发电等关键领域。SiC 芯片由于具有更高的热导率, 与传统的硅基芯片相比, 其开关频率、能量损耗与耐高温性能等方面具备更大的优势, 其芯片尺寸更小, 但也因此造成其有效散热面积的下降<sup>[1,2]</sup>。研究表明, 芯片的结温与器件的稳定性及使用寿命密切相关, 因此需要考虑可靠且高效的散热方案以满足设备高功率密度的需求<sup>[3-5]</sup>。

高功率开关器件的散热方式常采用空冷或液冷方案, 其中液冷方案需要提供额外的液循环系统, 成本更高, 风冷系统结构简单、可靠性高且成本较低, 被广泛

应用于电力电子设备散热<sup>[6,7]</sup>。空冷散热的相关研究主要集中于散热器结构设计及新材料应用等方面, 通过优化散热器的翅片结构, 改善流体流动情况, 来实现最优的散热效率<sup>[8-13]</sup>。研究表明, 采用新型的晶格结构散热器、蜂窝结构散热器以及微通道散热器, 使用石墨烯纳米复合材料来替代传统的金属材料, 在实现散热器轻量化的同时可进一步降低器件结温<sup>[13-15]</sup>。

综上所述, 相关研究侧重于散热器本身的结构设计与材料应用, 而关于散热路径规划以及散热气流分配规律的研究相对较少。本文结合工程实际应用, 以电动汽车、新能源发电领域常用的高功率开关器件为研究对象, 构建了包含分立式 SiC MOSFET 与翅片散热器的三维物理模型, 采用 ANSYS ICEPAK 仿真分析了

三种不同散热路径的风冷方案散热效果, 并基于仿真结果, 给出了进一步的优化设计方法, 重点探讨了多孔射流条件下, 气流分布对散热效果的影响作用。

## 2 强迫风冷散热系统

### 2.1 仿真建模

以分立式 SiC MOSFET 为研究对象构建仿真模型, 2 个 TO247-4 封装的分立式 SiC MOSFET 平行排列, 间距为 4mm, 单个功耗设为 20W。图 1 为仿真模型内部结构示意图, 散热器采用传统翅片结构, 材料为 6063 铝合金, MOSFET 内部采用多层材料结构, 包括外部封装、5.4 mm×4.2 mm×0.4 mm SiC 芯片、0.1mm 厚的芯片焊层、2mm 厚的铜基板以及 0.6mm 厚的导热绝缘硅胶片, 建模时忽略了对散热影响较小的器件引脚部分。散热器高度为 40mm, 翅片数量为 14 片, 基底厚度为 5mm, 散热器整体长度为 100mm。上述建模所涉及的材料和设计参数均符合现实产品的参数实际要求。

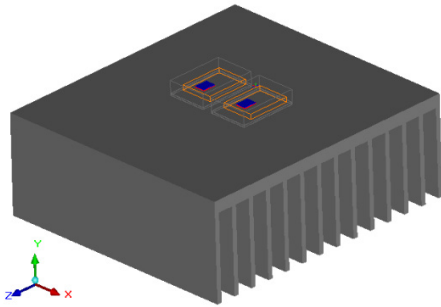


图 1 仿真模型内部结构示意图

采用强迫风冷的散热方式, MOSFET 器件与散热器放置于一壳体结构内部, 壳体尺寸为 200 mm×130 mm×75 mm, 由壳体表面不同的进风口设计与出风口布局, 形成不同的风冷散热方案。

### 2.2 控制方程与仿真参数设置

采用 ANSYS ICEPAK 仿真分析器件强迫风冷的稳态温度场与流场, 热量的传递以热对流和热传导为主, 不考虑辐射换热, 基本控制方程由连续性方程、动量方程和能量方程组成:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v V) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w V) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V T) = \nabla \cdot \left( \frac{k}{c_p} \nabla T \right) + \frac{S_h}{c_p} \quad (5)$$

式中  $t$  为时间, s;  $V$  为速度向量;  $x$ 、 $y$ 、 $z$  分别为笛卡尔坐标系下的三个方向;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向下的运动速度, m/s;  $p$  为压强, Pa;  $\tau$  为切应力, 其第一个下标为应力作用面的法向, 第二个下标为应力作用方向;  $f$  为单位质量流体微团的体积力, 下标为体积力的方向;  $k$  为热导率, W/m·K;  $T$  为温度, °C;  $S_h$  为热源项。

计算区域的网格划分采用 ICEPAK 的 Mesh-HD 六面体占优网格, 网格质量检查满足计算需求。入风口气流速度设为 2m/s, 由 ICEPAK 软件计算, 可自行判定气流流动状态为湍流, 湍流模型选择标准  $k-\varepsilon$  双方程模型, 忽略各项材料热导率随温度的变化, 环境空气温度为 25°C, 迭代计算时的连续项的残差设置为  $10^{-4}$ , 湍流项残差设置为  $10^{-3}$ , 能量项的残差设置为  $10^{-7}$ 。

### 2.3 风冷方案设计

图 2 为不同的风冷方案设计图, 基于考察不同散热气流路径的现实需求, 本文考察了三种风冷设计方案如下:

(1) 常规散热设计。壳体一侧采用圆形入风口, 半径为 18mm, 另一侧为出风口, 出风口面积为 0.00975m<sup>2</sup>, 散热气流从入口流入, 经由散热器翅片从另一侧流出, 形成水平散热路径, 其结构如图 2 (a) 所示;

(2) 底部多孔射流方案。侧面的圆形入风口改为壳体底部 9 个对称排列的多孔设计, 形成对散热器翅片区域的集中射流冷却, 从而影响散热器周边的整体气流分布, 单个射流小孔半径为 6mm, 多孔之间的间距为 4mm, 出风口保持不变, 9 孔的总面积与常规方案的入风口保持一致, 其结构如图 2 (b) 所示;

(3) 顶部多孔射流方案。将多孔设计改至壳体上表面, 多孔数量与尺寸保持不变, 集中散热气流至 MOSFET 的正上方, 预期实现对 MOSFET 表面的直接

射流冷却, 其余结构不变, 其结构如图 2 (c) 所示。

### 3 仿真结果分析

图 3 为三种风冷方案设计下的器件与散热器温度云图。研究表明, 三种方案下的器件温度分布规律基本一致, 温度峰值出现在中心的芯片区域, 采用常规散热方案设计的 MOSFET 芯片温度峰值为 72°C, 改用底部与顶部多孔射流方案后, 该温度峰值分别为 70.4°C 和 81.2°C, 前者温度下降了约 2.2%, 后者温度上升了约

12.7%, 底部多孔射流方案的温度结果最优。进一步分析表明, 顶部射流方案的温度上升, 主要是由该设计方案本身针对 MOSFET 器件直接射流冷却造成的, 其下方的散热器翅片被散热器基底遮挡, 缩小了有效散热面积, 射流方向与散热器结构特征产生了矛盾, 针对 MOSFET 器件的直接射流带来的温度下降与散热器的散热面积减小形成了相互抵消作用, 其实际散热效果并不理想。

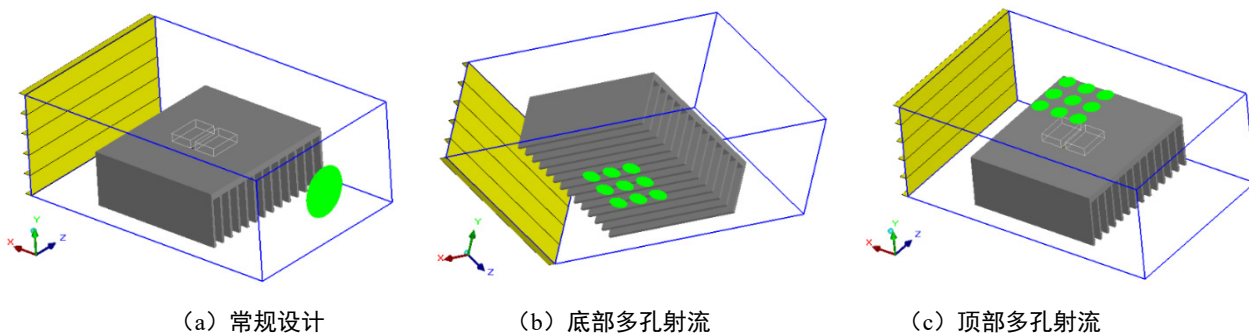


图 2 风冷方案设计图

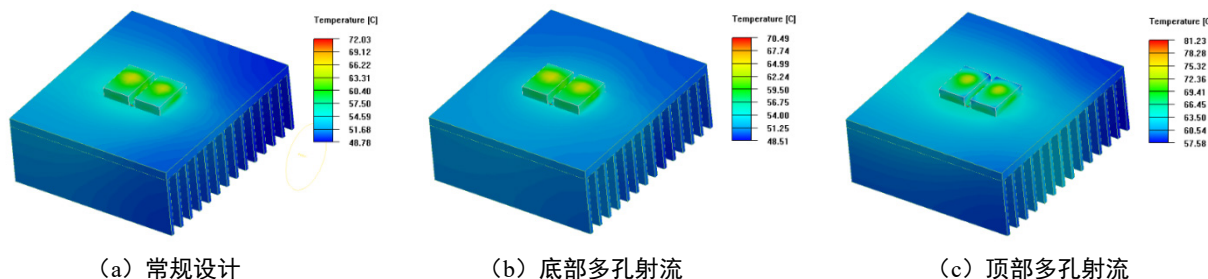


图 3 不同风道设计下的温度云图

图 4 为不同风冷方案设计下的流线轨迹图。研究表明, 常规方案时的气流流速最高, 气流流入散热器翅片后, 由局部结构引起了加速, 速度峰值为 2.12m/s, 气流轨迹分布较均匀, 散热器及器件周围均有气流流过, 但气流速度呈单向递减分布特征; 底部射流方案设计时, 气流速度峰值为 2.06m/s, 与常规方案相比略有下降, 高速区域集中于散热器的翅片间隙附近, 大部分气流经由散热器翅片间隙流向出口, 少部分气流则经由另一侧转向壳体上方空间, 经由 MOSFET 器件周边再流向出口, 该设计方案下的气流峰值虽然低于常规方案, 但其整体的气流分布更佳, 散热器翅片附近可以获得更多的气流分布, 从而实现良好的散热效果; 顶部多孔射流时, 速度峰值下降至 2m/s, 该峰值为入口风速, 这表明该设计方案下, 未带来气流加速效果, 大部分气流分布于散热器上方, 仅有少量气流绕流至散热器下方, 这也揭示了图 3 分析时提到的有效散热面积下降的原因, 该方案下

的气流分布特征结合温度云图分析表明, 风冷方案设计时, 需综合考虑散热器的结构特征, 单纯的直接射流冷却并不能简单替代散热器的散热效果。

图 5 为不同风冷方案设计下的速度剖面图, 剖面位置为 Y 方向的中心位置。计算结果表明, 常规方案时的高速区域集中于入口附近, 经由散热器后气流速度下降, 速度分布呈现单向递减特征, 散热器翅片间隙的速度分布较均匀; 底部射流方案的高速区域则集中于正对射流多孔的散热器中心区域, 散热器翅片的两侧位置呈明显的气流加速特征, 速度峰值位于靠近出风口一侧的翅片边缘附近, 高速区域更加集中, 且该高速区域均位于散热器翅片附近, 从而实现更佳的散热效果; 顶部射流方案与前两个方案相比, 散热器翅片间的速度分布明显较低, 速度峰值出现于散热器的上下两侧且靠近出风口的位置附近, 这种分布特征也进一步解释了其散热效果下降的原因。

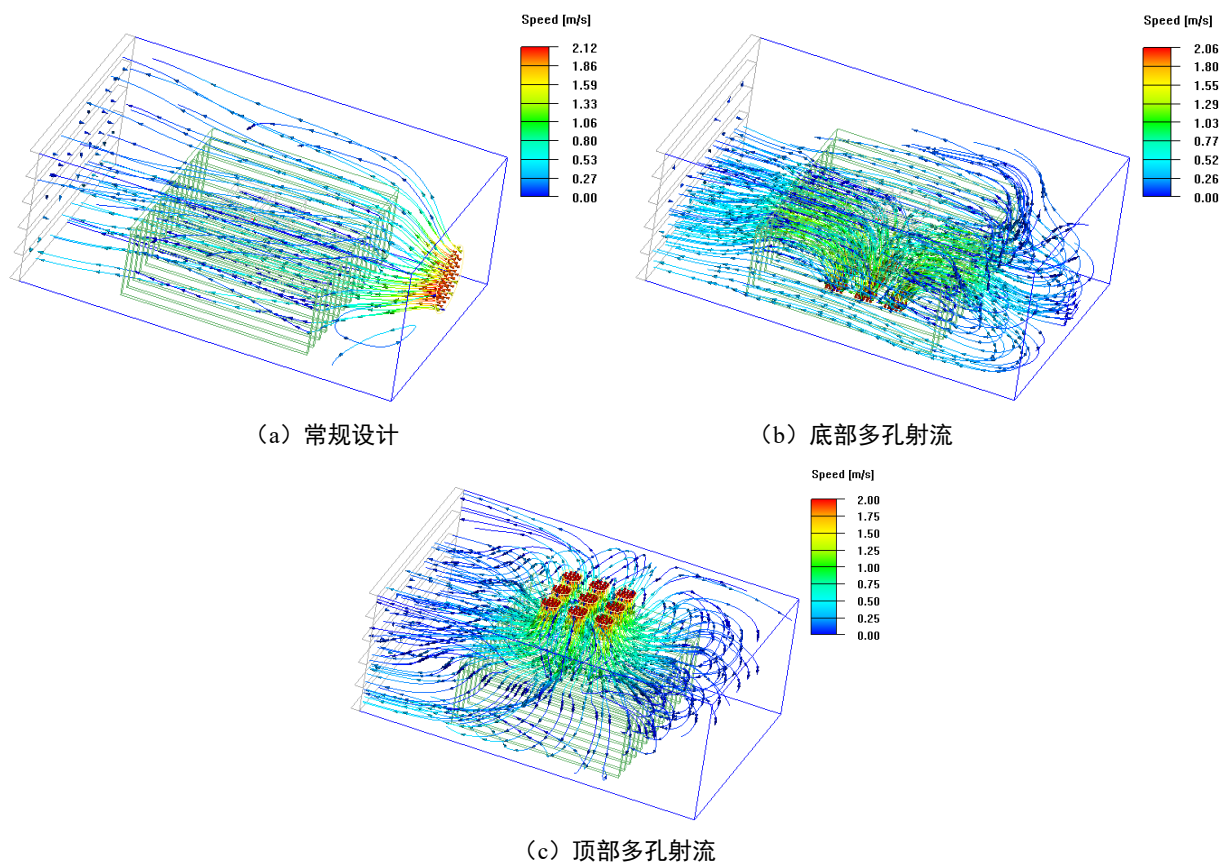


图 4 不同风冷方案设计下的流线轨迹图

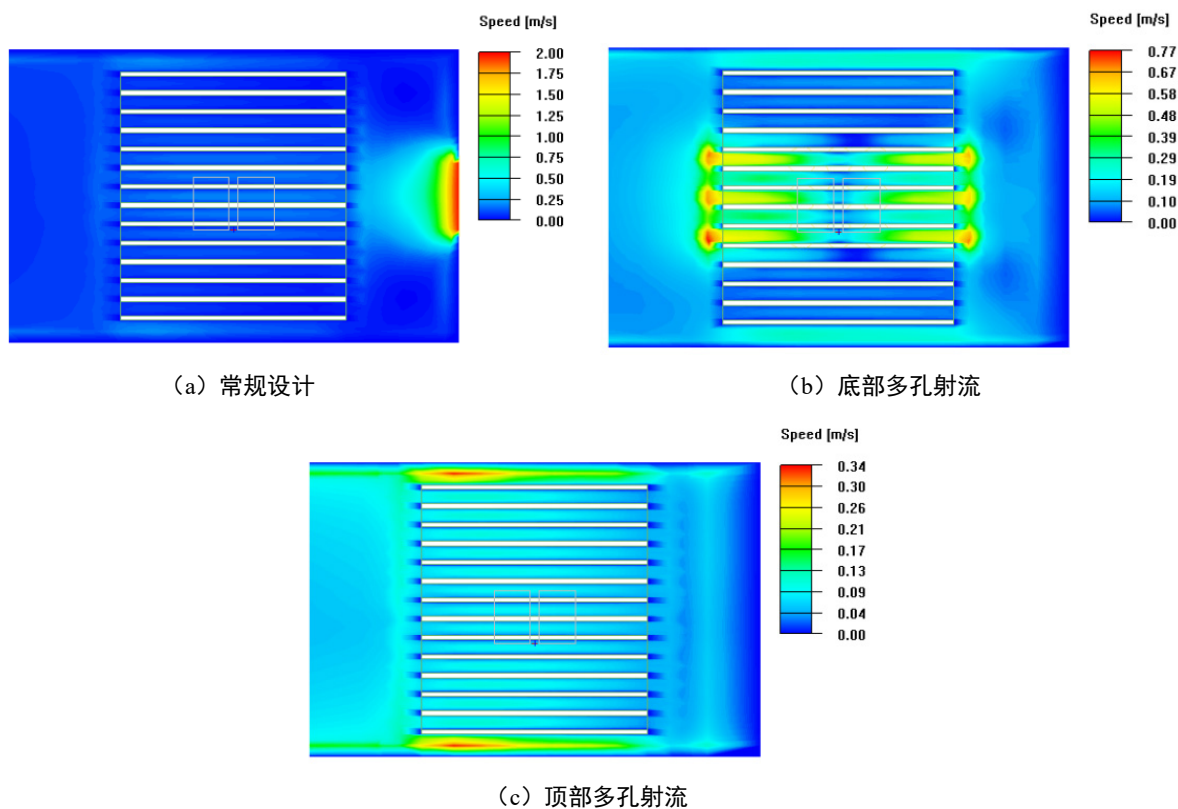


图 5 不同风冷方案设计下的速度剖面图

表 1 统计了 2 个 SiC MOSFET 的平均温度与标准差。对比分析表明, 底部多孔射流方案的平均温度最低, 与常规设计相比下降了约 2%, 与温度峰值下降比率基本一致, 该方案下的温度标准差也最低, 这表明该设计方案下的器件温度分布均匀性也为最优。

表 1 MOSFET 温度统计

设计方案	平均温度 (°C)	标准差 (°C)
常规设计	59.8	3.56
底部多孔射流	58.6	3.33
顶部多孔射流	69.1	3.75

#### 4 优化设计

基于前述底部射流冷却方案的仿真结果, 为保证不同方案的可比性, 出风口位置固定在壳体一侧不变。

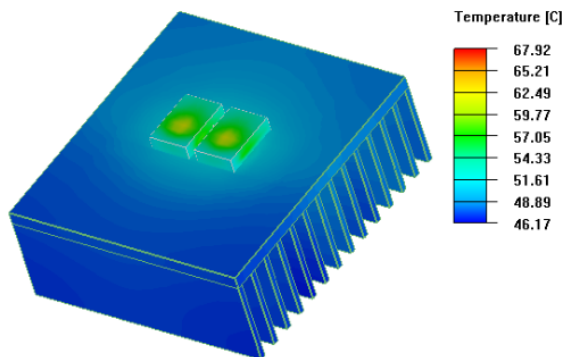


图 6 优化路径后的温度云图

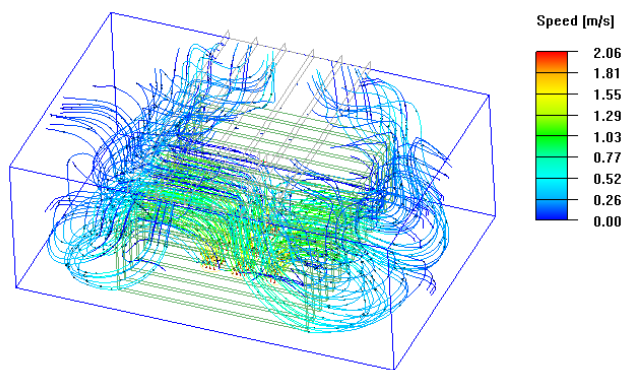


图 7 优化路径后的流线轨迹图

为优化散热气流路径, 进一步改善散热器区域的气流分布, 将出风口位置调整至壳体上方中央, 形成底部射流、顶部出风的散热气流路径, 其余设计参数不变。图 6 为优化设计后的温度云图, 图 7 为优化设计后的流线轨迹图。计算结果表明, MOSFET 芯片温度峰值下降至 67.9°C, 与常规设计方案相比, 下降了约 5.7%, 气流分配更加合理, 底部射流经由散热器底部翅片向两侧流动, 再转至散热器上方, 散热翅片可与气流形成充分的接触, 通过热对流带走更多的热量。优化后的 SiC MOSFET 的平均温度与标准差分别为 55.9°C 和 3.36°C, 标准差变化不明显, 但平均温度与传统设计方案相比下降了约 6.5%。优化设计的研究结果表明, 合理的散热气流路径规划从而改善气流分布, 可进一步提高风冷散热效果。

#### 5 结论

本文仿真分析了三种强迫风冷设计方案下的 SiC MOSFET 稳态温度场与流场, 在本文的计算条件下, 主要结论如下:

(1) 底部多孔射流方案设计可以兼顾温度峰值的降低与温度分布的均匀性, 其散热效果均为最优, 与常规的气流侧向流动散热相比, 面向散热器翅片的正面射流冷却效果更佳, 高速气流集中于散热器中心附近, 气流分布更加合理;

(2) 顶部射流方案预期实现的芯片直接射流冷却, 受散热器结构特征的影响, 造成了气流分布的严重不均, 散热器有效面积的下降抵消了直接射流带来的温度降低, 其实际散热效果不理想;

(3) 优化设计后的底部至顶部的纵向散热路径, 可使散热器与散热气流充分接触, 芯片的温度峰值与常规设计相比可降低约 5.7%。因此, 风冷散热设计时, 需要综合考虑散热结构及风口布局对气流分布的影响

作用, 优化散热气流路径, 可进一步提高实际散热效果。

#### 参考文献

[1] NAYAK D P, PRAMANICK S K. Implementation of an electro-thermal model for junction temperature estimation in a SiC MOSFET based DC/DC converter[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2023, 8(1): 42-53.

[2] CHEN Wei, JIANG Jing, MEDA A H, et al. A thin and low-inductance 1200 V SiC MOSFET fan-out panel-level packaging with thermal cycling reliability evaluation [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2023, 70(5): 2268-2275.

[3] FUKUNAGA S, FUNAKI T. Thermal decouple design of multi-chip SiC power module with thermal anisotropic graphite[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 2021, 11(5): 778-783.

- [4] KIM D H, OH A S, PARK E Y, et al. Thermal and electrical reliability analysis of TO-247 for bonding method, substrate structure and heat dissipation bonding material [C] // Proceedings of the IEEE 71st Electronic Components and Technology Conference, San Diego, USA, 2021:1950-1956.
- [5] LIN Hongyi, WANG Ziming, GUO Xiao, et al. A 380V/50kVar SiC-SVG achieving a power density of 1.652kVar/L with the optimization of heatsink and output filter volume [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(4): 4634-4649.
- [6] ZHANG Lei, LI Yan, ZHANG Yonglei, et al. A 100kW forced-air-cooled SiC MOSFET converter achieving a power density of 1.657kW/L and an efficiency over 98.5%[C]// Proceedings of IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference. NanJing, China, 2020: 3443-3448.
- [7] 林弘毅,郭潇,伍梁 等.电力电子装置强风散热模型简化方法及应用[J].浙江大学学报(工学版),2021,55(6): 1159-1167.
- [8] KESAVAN D, KUMAR R S, MARIMUTHU P. Heat transfer performance of air-cooled pin-fin heatsinks: a review [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2022, 148(3):623-649.
- [9] GORECKI K, POSOBKIEWICZ K. Cooling systems of power semiconductor devices-a review [J]. Energies, 2022, 15: 4566.
- [10] HAQUE M R, REDU R R, RAFI MAAA, et al. Numerical investigation of heat transfer performance for rectangular, elliptical, and airfoil shaped pin fin heatsinks through the novel combination of perforation and bulge inserts [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2022, 138:106352.
- [11] JONES A, DARABI J. Effect of fin geometry on the thermal performance of a phase change material heatsink [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 236:121973.
- [12] 宋俊驰,王德波.镀有石墨烯薄膜的散热器散热性能及其模型研究[J].微纳电子技术,2023,60(08): 1185-1192.
- [13] LI Jingnan, YANG Li. Recent development of heat sink and related design methods [J]. Energies, 2023, 16: 7133.
- [14] SAMSON S, TRAN P, MARZOCCA P. Design and modelling of porous gyroid heatsinks: influences of cell size, porosity and material variation [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 235:121296.
- [15] REDDY MVS, ADITHIYA A, SASIKUMAR S, et al. Enhanced thermal performance of lattice heat sinks with graphene nanocomposites: a comprehensive study [J]. Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences, 2025, 50(3): 165.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS