DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.05.001　　文章编号：1000-128X(2023)05-0001-09

碳化硅功率模块封装及热管理关键技术

盛　况，唐苇羽，吴　赞
（浙江大学 电气工程学院，浙江 杭州　310027）

摘　要：碳化硅功率器件具有耐高压、开关速度快和导通损耗低等优点，因此正在逐渐成为电力变换系统的核心器件，尤其在新能源汽车、可再生能源、储能、数据中心、轨道交通和智能电网等领域，器件的应用越来越广泛。然而，碳化硅器件持续的小型化和快速增长的功率密度也给功率模块封装与热管理带来了新的挑战。传统封装结构和散热装置热阻较大，难以满足碳化硅器件高热流密度冷却需求，同时，高功率密度模块散热集成封装需求也日益增长。针对上述挑战，文章对国内外现有的典型功率模块封装结构进行了详细介绍和分类对比；枚举比较了不同功率模块散热方式及其技术特点，如热扩散装置、对流换热和相变散热等；最后，结合以往的碳化硅功率模块热封装研究，对下一代碳化硅模块封装与热管理技术面临的挑战和未来的发展趋势进行了展望。

关键词：碳化硅；功率模块；封装；热管理技术
中图分类号：TN304.2^{+}4　　**文献标识码：**A

A state-of-art review on SiC power module packaging and thermal management key technologies

SHENG Kuang, TANG Weiyu, WU Zan

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: Silicon carbide (SiC) power devices have advantages such as high withstanding voltage, fast switching speed, and low conduction losses. Therefore, they are gradually becoming core components of power conversion systems, especially in areas such as new energy vehicles, renewable energy, energy storage, data centers, rail transit, and smart grids. Power devices applications are becoming increasingly wide-ranging. However, the continuous miniaturization and rapid increase in power density of SiC devices pose new challenges for power module packaging and thermal management. Traditional packaging structures and heat dissipation devices provide high thermal resistance, making it difficult to meet the high heat flux cooling requirements of SiC devices. Additionally, there is a growing demand for integrated heat dissipation packaging in high power density module. In response to the above challenges, this paper provided a detailed introduction and comparative analysis of typical power module packaging structures from both domestic and international sources. Different power module heat dissipation methods including their technical characteristics were enumerated and compared, such as heat spreaders, convective heat transfer, and phase change heat dissipation. Finally, based on previous researches on thermal packaging of SiC power modules, the challenges and future development trends in the next generation of SiC module packaging and thermal management technologies were discussed.

Keywords: silicon carbide; power module; packaging; thermal management technology

---

基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFB3604103）
通信作者：盛　况（1974—），男，博士，教授，博士生导师，主要从事硅基和宽禁带电力电子芯片、封装及应用研究；E-mail: shengk@zju.edu.cn
引用格式：盛况, 唐苇羽, 吴赞. 碳化硅功率模块封装及热管理关键技术[J]. 机车电传动, 2023(5): 1-9.
Citation: SHENG Kuang, TANG Weiyu, WU Zan. A state-of-art review on SiC power module packaging and thermal management key technologies[J]. Electric drive for locomotives,2023(5): 1-9.

0 引言

碳化硅金属氧化物半导体场效应管（SiC MOSFET）作为典型的宽禁带半导体器件，相较于硅基功率器件，具有耐高压、耐高温、开关速度快、导热率高和导通电阻低等优点，因此逐渐被用于新能源、光伏发电、轨道交通和智能电网等重要领域的电力电子系统中，助力系统能效与功率密度的不断提高。为充分发挥碳化硅功率器件的上述优良电气特性，需通过封装结构实现电信号的可靠连接与器件结温的稳定控制。传统封装和热管理技术在碳化硅功率器件应用中面临着一些关键技术挑战。

目前已有的商用碳化硅功率模块大部分仍沿用硅基器件的平面封装方式，其封装结构如图 1 所示。在该模块结构中，多个功率芯片（包括 SiC MOSFET 和碳化硅肖特基二极管 SBD）被焊接或粘贴于同一绝缘衬板的金属化表面，该衬板既承担模块的电气绝缘作用，同时又是模块整体封装热阻的重要组成部分，而功率芯片正面的电气连接则采用铝线/铜线键合方式来实现。

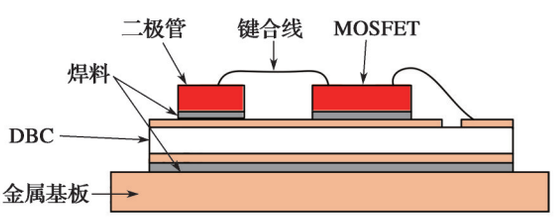


图 1 传统功率模块平面封装结构

Fig. 1 Traditional planar packaging structure of power modules

常见的功率器件失效方式如引线键合翘曲/脱落、焊料层裂纹/剥离以及芯片过热损坏等均是由热封装结构散热能力不足引起的。在额定电流和电压相同的前提下，碳化硅器件的尺寸可以比硅器件更小[1]，这对高功率密度、高散热能力的模块设计与制造提出了要求。商用 1 200 V/150 A 硅基 IGBT 和碳化硅基 MOSFET 器件尺寸对比如图 2 所示，由图 2 可知后者的面积仅约为前者的 1/5。因此，虽然碳化硅器件导通和开关损耗显著降低，但其衬底面积的收缩会导致模块热阻的显著增加。

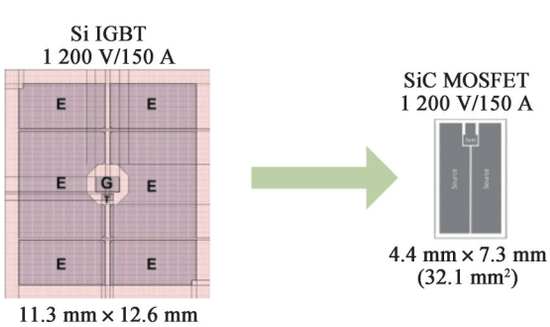


图 2 同规格 Si IGBT 和 SiC MOSFET 尺寸对比

Fig. 2 Size comparison of Si IGBT and SiC MOSFET with the same specifications

针对上述问题，国内外学者分别从封装结构和散热技术 2 个方面出发，通过减小封装导热热阻和外部散热热阻来满足碳化硅高热流密度散热需求。本文聚焦碳化硅功率模块热封装结构和高效散热方式 2 个关键点，对现有的碳化硅功率器件封装和热管理技术进行分类梳理和总结，并在此基础上讨论高功率密度碳化硅封装在散热方面面临的挑战和重要发展趋势。

1 碳化硅器件低热阻封装技术

典型的碳化硅功率模块封装的热阻由芯片衬底、芯片焊料层、覆铜陶瓷基板（DBC）、基板焊料层、金属散热基板、热界面材料（TIM）和散热器的热阻组成。碳化硅具有良好的导热性能[270 ~ 450 W/(m·K)]，其主要热阻包括焊料层、DBC、金属基板、TIM 和散热器。因此，双面冷却封装、压装封装和冷却集成封装等先进封装技术被相继提出，以通过充分利用碳化硅芯片底面及顶面的散热面积、缩短结至流体或环境的热流传递路径来降低模块封装热阻。

1.1 双面冷却封装技术

为实现碳化硅功率器件的可靠双面散热，在传统平面封装的基础上，引入如顶部铜引脚框架或铜带[2]、金属垫块[3]等顶部互联方式，并采用银烧结来实现芯片侧的低热阻互联，该类封装可承受 220 °C 以上的高温（如图 3 所示）。由于芯片上下表面均采用 DBC 焊接散热，热流路径在垂直方向上出现 2 条并联支路，相较于传统的单面冷却模块，其热阻可降低 38%[2, 4]。此外，该封装可完全消除功率回路的引线键合结构，借助高可靠性界面实现互联，相较于传统封装可实现 10 倍以上的可靠性提升[5]。中国中车[6]、重庆大学[7]、天津大学[8]和美国弗吉尼亚理工学院[9]等分别针对双面冷却模块的封装结壳热阻、热应力和外部射流冷却集成等开展了多物理场耦合优化研究。

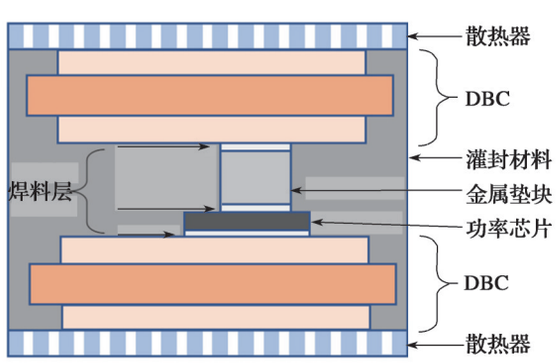


图 3 双面冷却焊接功率模块

Fig. 3 Double-sided cooling power module

压装封装则是另一种在高压直流输电和轨道交通等领域广泛应用的双面冷却封装形式，具有无焊接点、无引线、可靠性高、双面冷却和高功率密度等特性，突破了传统器件键合点和焊料层失效的瓶颈问题。浙

江大学[10]设计提出的碳化硅双面冷却压装模块结构如图4所示，该结构通过在薄膜中介层中采用微型柔性压脚来实现器件顶部电热连接。值得注意的是，由于该压装模块的散热器被涵盖在功率回路中，为避免引入过大寄生电感，设计了基于低温共烧结陶瓷（LTCC）的超薄微通道结构，其结流热阻为0.7 K/W。

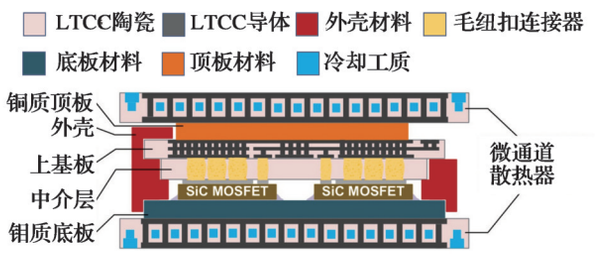


图4　压装碳化硅双面冷却功率模块

Fig. 4　A press-packed silicon carbide double-sided cooling power module

1.2　冷却集成封装技术

针对传统平面封装或上述双面冷却封装的研究大多将散热器独立于模块封装以外，因此，需要引入低导热系数[1~20 W/(m·K)]的热界面材料，以减小接触热阻，而这会显著增加模块的结流热阻。因此，为应对日益增长的碳化硅功率模块冷却需求，需要进一步减少或消除热路径中的许多封装层，从而降低热阻。

1.2.1　散热基板液体冷却

2014年，美国橡树岭国家实验室率先开展了碳化硅功率模块集成液冷研究，并指出冷却集成功率模块的结流热阻比传统封装模块对应值低30%[11]。散热基板的形式也历经针翅阵列、波状带翅片、ShowerPower三维流道[12]（流道结构如图5所示）和双层逆流流道等[13]不同拓扑演变，其中针翅阵列和三维流道由于其均温效果好、安装简单等优点，已经成为主流散热方式，被广泛应用在英飞凌和丹福斯等厂商的功率模块产品中。

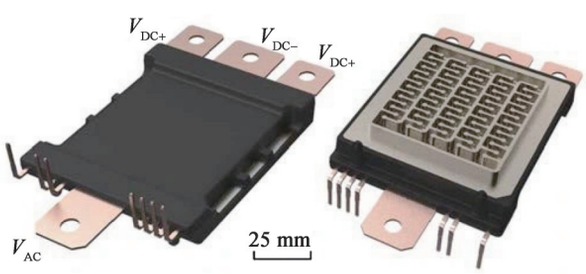


图5　ShowerPower液冷集成封装模块

Fig. 5　A ShowerPower liquid-cooling power module

1.2.2　绝缘覆铜基板嵌入式冷却

为了进一步缩短热流传递路径，绝缘覆铜基板集成式冷却技术也被提出[14]。该技术通过激光刻蚀或干法刻蚀等工艺在绝缘衬底中加工出宽度仅为百微米级别的微流道结构，从而充分利用微通道的对流散热能力，降低封装结流热阻。在此基础上，斯坦福大学[15]提出了一种基于覆铜绝缘陶瓷基板激光刻蚀的多层歧管微流道功率模块结构原型，其单位面积结流热阻为0.2 cm^2·K/W。北京大学[16]则在绝缘碳化硅衬底中构建了梯度嵌入式微型针翅，并利用晶圆键合和纳米银烧结工艺，制备了碳化硅衬底覆铜绝缘基板，最终封装得到的功率模块相比普通的基板液冷方案，其结至流体的热阻下降了78.9%。上述绝缘基板嵌入式冷却方法可削弱陶瓷基板导热热阻在结流热阻中的占比，显著提高冷却能效，但由于微流道刻蚀工艺复杂、封装热力可靠性不明，其具体封装工艺和拓扑结构有待进一步优化研究。

1.2.3　无绝缘基板直接冷却封装

常用的绝缘陶瓷基板材料，如氧化铝、氮化铝和氮化硅等，相较于常规的铜铝金属材料，具有相对较低的导热系数，其热阻和可靠性会对功率模块的整体性能产生重要影响。为消除其影响，美国相关机构[17]于2017年提出了采用电子冷却液直接冷却的无绝缘基板封装技术，以突破传统封装的散热、可靠性和寄生电感挑战。该结构将功率器件直接堆叠在铜质散热器层之间，并通过芯片顶部和底部的散热器实现直接接触式冷却，最终的封装单位面积结流热阻为0.25 cm^2·K/W。

这种设计可消除单一功能组件，使得散热器同时承担电气连接与冷却2种功能，大幅减少封装热阻，但是，由于电气绝缘冷却液的导热率低、散热面积有限，其冷却效率受限。受此启发，西安交通大学[18]设计制备了三维垂直堆叠无绝缘基板功率模块，模块结构如图6所示，其中的一个散热器被直接嵌入到输出功率端子中，相较于外侧双面液冷方案，该内嵌散热器可将芯片最大结温降低33.8%。

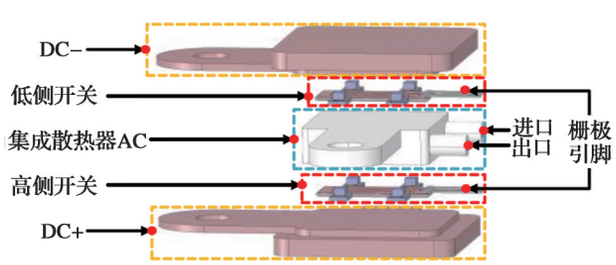


图6　三维垂直堆叠无基板功率模块

Fig. 6　A 3D vertically stacked power module without DBC

三维垂直堆叠功率模块封装对多层键合或焊接时的垂直高度有精确要求，这也使得其制备过程较为复杂，增加了广泛应用的难度。美国国家可再生能源实验室[19]则基于电子冷却液冷却提出了一种无基板紧凑型功率模块冷却集成封装结构，如图7所示，该结构通过将芯片直接焊接到铜质翅片散热器上，在直流输入和交流输出2个电位上采用不同的散热器，并在散热器背面使用优化设计得到的分流层，引导流体直接冲击翅片表面，实现了低至0.19 cm^2·K/W的热阻。与同等条件下的常规液体基板冷却方案相比，该方案的热阻下降约56%，泵功率下降约90%。

无绝缘基板冷却集成封装方案是近年来针对功率

芯片高热流密度散热需求提出的一种全新的封装结构，其可充分利用功率芯片的正面与背面的热传导扩散作用，同时消除了导热热阻较大的绝缘基板，是超高功率密度碳化硅模块封装的重要发展方向。

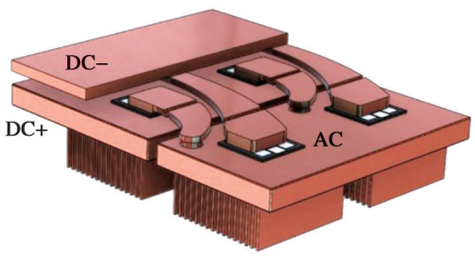


图 7　无基板电子冷却液冷却功率模块

Fig. 7　A dielectric liquid-cooling power module without DBC substrate

2　碳化硅功率模块热管理技术

相较于直接改变功率模块的整体封装结构或减少封装层数的方案，通过引入热扩散装置、对流换热技术和相变散热技术等先进热管理方法，可在尽可能保持现存封装结构的基础上，为高热流密度碳化硅功率芯片提供可靠冷却。因此，先进的外部热管理技术在冷却集成封装和封装外部热管理方面均有着广阔的应用前景。

2.1　热扩散装置

热扩散装置可利用工质气液相变的均温性和热质传递能力，将局部集聚的高密度热流快速扩散至更大表面积。热管就是一种理想的热扩散装置，其内部工质始终工作于饱和温度，饱和蒸汽从蒸发端流动至冷凝端的压降较小，因此热管两端具有较小的温差。利用热管或其变形结构（如环路热管、脉动热管、重力热管和均温板等）可显著提升电力电子设备冷却效果。值得注意的是，热管这类热扩散装置的主要作用只是将蒸发侧局部集中热流相对均匀地扩散到冷凝侧，而热量的散发最终仍需依靠冷凝侧外部散热器，这种装置工作可靠、无须外部冷却介质，因此常与空气冷却相结合使用，提升空气冷却能力。

2.1.1　环路热管、脉动热管和重力热管

环路热管由毛细泵、冷凝流道、储液器和蒸发流道组成，它们依次串联形成循环回路。其中毛细结构的芯吸作用作为驱动力，将功率器件产生的废热通过工质的气液相变从蒸发器传递至冷凝侧。文献[20]和文献[21]分别对环路热管在IGBT功率模块和汽车电子上的应用进行了试验探索，制备得到的环路热管样机可实现 1.5 m 的长距离热量传输，且在热源温度不超过 100 ℃时，传输热量功率超过了 900 W。

相较于环路热管，脉动热管的结构简单紧凑，但其脉动具有很大的偶然性，微通道内部气液两相脉动流动导致工质的温度、压力和速度难以通过计算确定。美国相关机构[22]将脉动热管应用于全桥功率模块的冷却，发现相较于传统的空气冷却和冷板冷却，其冷却温度均匀性和散热能力均更好。然而脉动热管由大量的微小脉动通道组成，难以完全覆盖大尺寸和大功率的功率模块冷却需求。因此，文献[23]基于由三维U型回转毛细管阵列组成的脉动热管开展功率器件冷却研究，发现在最高负荷（400 W）下，脉动热管蒸发侧到空气的热阻低至 0.13 K/W。然而，脉动热管毛细管束阵列在运行中易出现振动噪声，这会影响其与底板及功率模块的界面连接可靠性。

重力热管由于其无须毛细芯、价格低廉，也逐渐应用于功率模块的热管理中。以往研究表明，传统的重力热管可对热损耗功率为 6 kW 的IGBT功率模块有效冷却，同时还能解决IGBT模块的局部高温问题。南京理工大学提出的一种自然冷却型重力热管散热器[24]的方案如图 8 所示，该散热器采用蒸发器取代传统功率模块封装中的金属基板，可消除传统重力热管嵌入基板所形成的接触热阻，大幅改善热管的冷却性能。

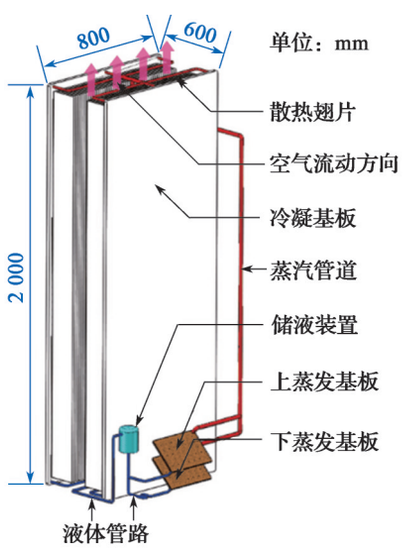


图 8　自然冷却型重力热管散热器

Fig. 8　Natural cooling gravity heat pipe heat sink

2.1.2　毛细芯热管和均温板

毛细芯热管和均温板的蒸发侧和冷凝侧换热面均有毛细芯吸结构，可促进蒸发表面的薄膜蒸发以及凝结液的快速回流。典型毛细芯结构包括微沟槽、金属丝网和烧结粉末等，因其稳定散热能力而被广泛应用于处理器芯片和移动电子设备的热管理中，在功率模块的热管理方面也得到越来越多关注。

在毛细芯热管方面，长沙理工大学[25]设计了一种面向功率模块冷却的三维异形平板热管，其蒸发侧采用平板块状设计，而冷凝侧则沿用传统管状阵列结构，对比发现该异形结构可将热源面温度降低 6.7~13.7 ℃，其最大等效导热系数可达 10 000 W/(m·K)以上。类似地，西安交通大学[26]针对多电平变换器中功率模块的冷却需求，基于功率模块的三维热力仿真，通过匹配

热管与芯片排布位置实现热扩散最大化，设计得到如图9所示的O型热管散热器，该散热器最高可将局部热点温度降低20%。

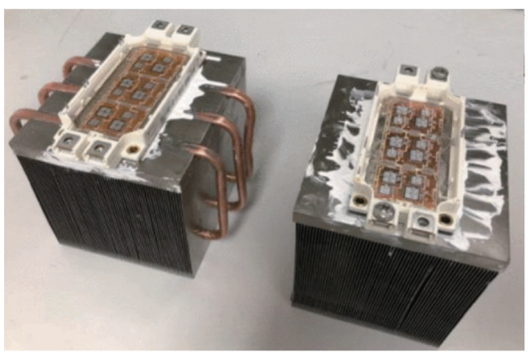


图9　基于O型热管散热器的功率模块冷却方案

Fig. 9　Power module cooling solution based on O-shaped heat pipe heat sink

与热管不同，均温板具有轻薄紧凑的结构和出色的面内横向热扩散能力，可集成在功率模块内，显著降低结壳热阻。中车株洲电力机车研究所有限公司[27]在功率模块与散热器之间直接添加均温板开展散热测试，测试结果表明均温板可将散热器温升降低12.7 K，且使得功率器件的温度不均匀性指数下降超过55%。诺丁汉大学和丹尼克斯公司[28]则采用均温板直接替代功率模块的金属基板，使得结温、温度不均匀性和总热阻相较于传统封装分别下降34.6%、76.6%和41.6%，可见均温板的高效热扩散能力可为功率模块紧凑封装设计提供新的解决方案；同时他们还通过三维有限元仿真验证了均温板对热应力、蠕变、塑性应变的能量耗散及热疲劳寿命等的改善作用[29]。

在碳化硅模块应用方面，西安交通大学[30]则采用类似方案，针对多电平变流器中非均匀热流功率芯片的冷却需求，评估了均温板对芯片温度均匀性和温度波动特性的影响，试验发现嵌入均温板后模块最高温度以及温度极值差分别下降了11.1%和18.7%。此外，他们还探索了将均温板嵌入到碳化硅功率芯片与覆铜陶瓷基板之间的封装结构[31]（如图10所示），结果发现该模块可在芯片热流密度高达632 W/cm^{2}的条件下运行，且芯片结温仍在允许范围内。但需要注意的是，受目前均温板的热质传递能力限制，直接嵌入在芯片底部的均温板体积较大，可能会带来寄生电感、键合线可靠性等问题。

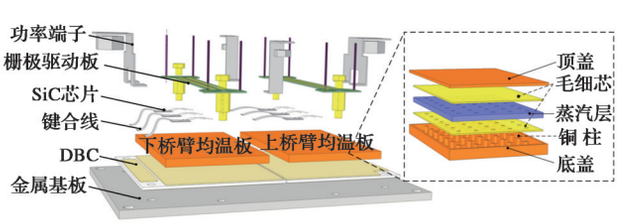


图10　直接嵌入均温板碳化硅功率模块结构

Fig. 10　Structure of SiC power module with directly embedded vapor chamber

2.2　对流换热技术

对于高热流密度碳化硅功率器件，对流换热相较于辐射冷却等散热方式而言，能够提供相对较强的冷却能力，是将热量传递至环境中所必须的热管理手段。对流冷却技术按冷却工质分类，可分为空气冷却和液体冷却2类，其中空气冷却由于技术成熟、结构简单和易于获取等优势，已成为各类电力电子器件冷却的首选方案。然而功率器件热流密度的不断增长也使得先进液体冷却技术成为高功率密度碳化硅模块热管理的发展趋势之一，微射流冲击和微通道单相对流等高效液冷技术受到日益广泛的关注。

2.2.1　射流冲击冷却

由于流体的直接冲击作用，射流冲击可提供远优于常规对流换热方式的换热性能，然而剧烈的流体冲击和方向转折往往会带来较大的流体压降，因此，合理的流体分配是提高冷却能效的关键。佐治亚理工学院[32]提出了一种DBC嵌入式针翅射流冷却方案如图11所示，并结合仿真与试验得出，相较于基板直接针翅结构，该方法可将结至流体的总热阻减小37.3%（逆变器冷却总流量为10 L/min）。欧洲微电子研究中心[33-34]设计制备了喷嘴直径为500 μm的4 × 4射流阵列冷却装置，其热阻低至0.25 K/W（0.16 cm^2·K/W），该装置在热源区域内呈现出良好的温度均匀性。在应用方面，Teledyne科技公司[35]设计制备了射流冷却高温碳化硅功率模块，试验结果表明在151 W的热功耗下，射流冲击可将器件温升下降74%，其性能要优于商用微通道散热器。亚琛工业大学[36]则提出了针对单个电力电子芯片的独立射流腔室冷却方案，削弱器件间的热耦合作用，从而提升温度分布均匀性。

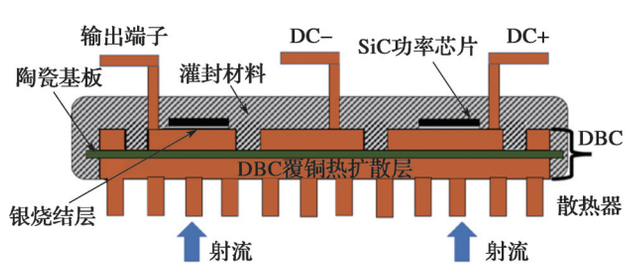


图11　DBC嵌入式针翅射流冷却

Fig. 11　Embedded impingement cooling on pin fins for DBC

射流冷却结构可紧凑嵌入到器件封装结构中来实现复杂电热耦合，而其中的关键点在于根据电热系统参数间的相互影响来构建并优化电热结构[37]。因此，如何结合各类优化方法（如遗传算法、神经网络等）来开展面向优化目标（冷却温度均匀性、冷却能效和热阻等）的电热协同设计，是先进射流冲击方法在碳化硅模块封装热管理中应用的关键科学问题。

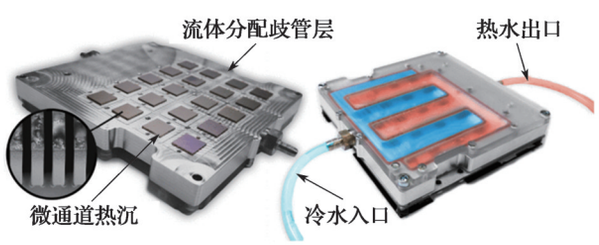
2.2.2　微通道单相对流冷却

微通道因其较大的表面积体积比而成为高功率密度电子器件高效冷却最有前景的技术方向之一。微通

道一般指水力直径在几十或几百微米量级的微小通道，常以微通道阵列的方式出现以满足大面积冷却需求。

格勒诺波尔电气工程实验室[38]提出了一种基于集成微通道冷却器的高效冷却功率器件概念，微通道阵列直接由多个相互平行且垂直穿过晶圆的流体过孔组成，流体将直接进入垂直功率器件的漂移区并垂直于器件的PN结，从而实现极致紧凑散热。试验结果表明，该结构存在电气和热管理上的理论可行性，但其测试热阻和理论值偏差较大，且热阻值较大。

虽然随着微通道水力直径的减小，其换热性能会随之改善，但由此带来的压降上升将导致冷却系统效率降低，因此需要采用包括歧管微通道[39]和双层逆流微通道在内的结构来实现液体的高效利用。西安交通大学[40]提出了面向功率模块的基板逆流微通道冷却集成设计方案，并发现短流程微通道冷却方案的冷却能效系数可达长流程方案的6倍以上。洛桑联邦理工学院[41]则采用了多个微流体冷却器，并提出一种高效冷却的氮化镓DC-DC变换器方案，其装置如图12所示，装置引入了2个歧管分流层来实现对20个氮化镓晶体管的均匀液体冷却，结果表明在60 K温升下该方案可实现对高达600 W热量的可靠冷却。



（a）底部硅基微通道冷板　（b）顶部聚碳酸酯歧管盖板

图12　DC-DC变换器微流体冷却装置

Fig. 12　Microfluidic cooling device for DC-DC converter

目前微通道单相冷却技术已经可以满足热流密度高达1 000 W/cm^{2}的单芯片可靠冷却，但在功率模块多芯片冷却应用中还存在通道过小易于堵塞[42]、各芯片冷却不均[43]等问题，因此如何通过优化封装工艺来实现可靠流体分配与均匀冷却是技术应用的关键问题。

微通道液体冷却装置常采用的工质包括水、防冻液和电子冷却液等，这些工质相对较低的流体导热系数导致其冷却能效较低。液态金属作为一种高导热流体，近年来也逐渐被用于微通道冷却装置。以往试验研究表明[44]，在相同的微通道结构条件下，采用铟稼锡合金材料作为冷却工质时其对流热阻仅为水的60%。此外，液态金属可通过电磁泵流量主动控制[45]和液滴主动热开关[46]等方式集成在热管理系统中来帮助实现芯片结温的主动调控，减小芯片间温差和温度波动幅度。

2.3　相变散热技术

受限于工质有限的热容和导热系数，单相对流换热技术的换热系数往往较低；相变散热技术充分利用了工质的相变潜热，因此其冷却效率和均温性均显著优于单相对流换热，因此，相变冷却技术是高功率密度碳化硅功率模块冷却的重要发展方向。

2.3.1　相变材料

由于碳化硅功率芯片的尺寸大幅减小，其对应的热容显著下降，因此在相同工况下，碳化硅功率器件面临更加严峻的由温度波动带来的热可靠性问题。不同于热扩散装置，相变材料（PCM）主要利用固液相变潜热来实现功率器件瞬态热量的“削峰填谷”（材料融化可吸收瞬态尖峰热流，材料凝固可释放热量），因此可将其作为一种减小器件温度瞬态波动的有效热管理手段。

重庆大学开展了面向平面封装IGBT模块[47]、压装封装模块[48]、晶闸管[49]和整流器[50]等多种传统功率器件的PCM热缓冲特性研究，在封装结构中嵌入低熔点合金相变材料，并通过试验验证了固液相变材料对瞬态过电流工况或周期性波动热流工况的结温钳制作用，PCM材料可减小功率模块的最高结温以及结温波动值，提高功率模块可靠性。在碳化硅功率模块应用方面，浙江大学基于数值仿真开展了嵌入PCM的碳化硅功率模块封装结构优化研究，封装结构如图13所示[51]，并提出一种枝干状的相变材料容器及其对应封装结构，能够降低碳化硅器件结温波动极值差12 K以上。

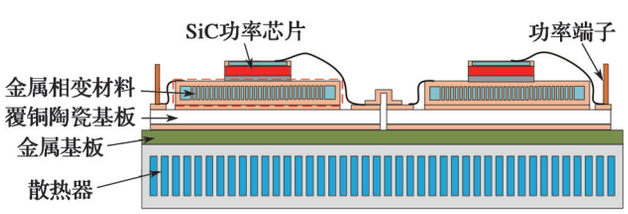


图13　PCM热缓冲碳化硅功率模块封装结构

Fig. 13　Package structure of SiC power module integrated with PCM thermal buffer layer

目前，相变材料展现出优异的瞬态热管理潜力，理想的相变材料应具备储热密度高、体积热膨胀率小、物化性质稳定和热导率高等特点，如何进一步提高相变材料的瞬态响应速度、储热密度和长期稳定性是该技术发展的重要方向。在碳化硅器件应用方面，目前针对碳化硅功率模块的PCM封装工艺和PCM瞬态热作用机理的研究都存在较大不足。

2.3.2　气液两相冷却

气液两相对流冷却可充分利用冷却工质的气液相变潜热，同时气液相界面温度被恒定在饱和温度，因此其冷却能效要显著优于单相对流。根据流动形式差异，气液两相冷却可细分为池沸腾和流动沸腾。

其中池沸腾即大空间浸没式相变冷却，待冷却器件被直接放置在电子冷却液中，通过表面的液体气化吸热来实现冷却。3M公司[52]开展了IGBT模组的浸没相变冷却原型试验，结果表明被动式两相浸没冷却性能与双面微通道水冷的功率模块性能相当，且其封装结构可显著简化，无须外部泵、冷板以及DBC绝缘基

板等。西安交通大学[53]则将浸没式相变冷却技术应用于高压高速脉冲发生器冷却中，结果表明使用该冷却方法可在不改变原有电路排布的前提下降低壳至环境的热阻。作为一种被动的高效冷却方法，目前针对碳化硅功率模块的浸没式冷却研究仍较少，存在池沸腾换热性能不足、微纳多孔相变换热表面耐久性差、浸没式冷却系统密封要求较高以及工质兼容性等问题。

通过结合微通道高效对流换热和相变换热，流动沸腾可实现高热流密度的高效冷却。代尔夫特理工大学[54]采用制冷剂R1234yf和热测试芯片，对通道截面为0.5 mm×6 mm的微通道阵列开展了两相冷却性能测试，结果表明该装置可满足高达526 W/cm^{2}的芯片热流密度的冷却需求，且结温低于120 °C；他们还指出平行微通道在流程方向上存在显著的冷却不均。巴斯克大学[55]结合试验与数值模拟研究发现，相较于单相水冷却，采用制冷剂R134a的流动沸腾冷却可将IGBT器件的结温降低39 °C，且两相冷却时各芯片间的温度均匀性显著提高。

流动沸腾有着更高的冷却性能，但面临着气液两相流动存在不稳定性、工质循环系统密封要求高、两相流体分配不均以及相间复杂作用难以准确建模等挑战，目前仍需更多相关研究以填补上述空白。

3　结论

碳化硅功率模块的冷却系统设计已经逐渐成为其应用的关键组成部分，为满足日益增长的功率密度和模块可靠性需求，先进热管理技术必须与其封装紧密结合，才能获得最大收益。本文对现有的主要碳化硅功率模块封装冷却形式以及热管理技术进行了较全面的综述总结。

在封装层面，双面冷却和冷却集成是高功率密度碳化硅模块封装的发展趋势，在未来的功率模块封装中，减少芯片散热路径上的导热热阻是先进封装热管理的关键，其主要措施包括充分利用芯片顶部散热（采用更大面积的顶部接头）、采用散热基板集成冷却、DBC集成冷却或直接液冷封装等。需结合碳化硅功率模块封装工艺和应用场景，开发兼容的热管理集成技术，评估其对模块热学和电学性能的影响，研究冷却工质和封装结构对电气绝缘以及模块可靠性的影响机制。

在热管理技术方面，采用热扩散装置尤其是热管和均温板是有效提升现有碳化硅功率模块空气或液体冷却性能的重要手段，需要对瞬态工况下装置的启动性能以及功率模块的可靠性开展进一步研究。相变材料作为一种特殊的储热元件，有望作为碳化硅模块热容的补充，减小结温的波动幅度从而提升模块可靠性。射流、微通道单相对流和气液两相冷却等方式可满足超高功率密度模块的冷却需求，需要结合流体分配和器件排布，形成碳化硅模块电热协同设计方法，以指导具体应用的定制化热管理设计，满足结温控制、均温性和封装结构等多方面的限制。

由于技术迭代或变化的渐进性，目前碳化硅模块封装供应商仍倾向于沿用硅基功率模块封装的技术路线，因而正在研究的新型封装和先进热管理技术仍需更充分地验证与进一步完善才能实现广泛应用。

参考文献：

[1] JI Shiqi, ZHANG Zheyu, WANG F. Overview of high voltage SiC power semiconductor devices: development and application[J]. CES transactions on electrical machines and systems, 2017, 1(3): 254-264.

[2] WOO D R M, YUAN H H, LI J A J, et al. Miniaturized double side cooling packaging for high power 3 phase SiC inverter module with junction temperature over 220 °C[C]// IEEE. 2016 IEEE 66th Electronic Components and Technology Conference. Las Vegas: IEEE, 2016: 1190-1196.

[3] JEON J, SEONG J, LIM J, et al. Finite element and experimental analysis of spacer designs for reducing the thermo-mechanical stress in double-sided cooling power modules [J]. IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, 2021, 9(4): 3883-3891.

[4] DING Chao, LU Shengchang, ZHANG Zichen, et al. Double-side cooled SiC MOSFET power modules with sintered-silver interposers for a 100 kW/L traction inverter [J]. IEEE transactions on power electronics, 2023, 38(8): 9685-9694.

[5] STOCKMEIER T, BECKEDAHL P, GÖBL C, et al. SKiN: double side sintering technology for new packages[C]// IEEE. 2011 IEEE 23rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. San Diego: IEEE, 2011: 324-327.

[6] WANG Yangang, LI Yun, DAI Xiaoping, et al. Thermal design of a dual sided cooled power semiconductor module for hybrid and electric vehicles[C]//IEEE. 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Tampa: IEEE, 2017: 3068-3071.

[7] 曾正, 欧开鸿, 吴义伯, 等. 车用双面散热功率模块的热-力协同设计[J]. 电工技术学报, 2020, 35(14): 3050-3064.
ZENG Zheng, OU Kaihong, WU Yibai, et al. Thermo-mechanical co-design of double sided cooling power module for electric vehicle application[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2020, 35(14): 3050-3064.

[8] LIU Siqi, MEI Yunhui, LI Jing, et al. Copper-wire stress buffers for extending lifetime of double-sided bidirectional SiC modules[J]. IEEE transactions on power electronics, 2023, 38(6): 7118-7127.

[9] CAIRNIE M, DIMARINO C. 10 kV SiC MOSFET power module with double-sided jet-impingement cooling[C]// IEEE. 2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Orlando: IEEE, 2023: 336-343.

[10] ZHU Nan, MANTOOTH H A, XU Dehong, et al. A solution to press-pack packaging of SiC MOSFETS[J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2017, 64(10): 8224-8234.

[11] LIANG Zhenxian, NING Puqi, WANG F. Development of advanced all-SiC power modules[J]. IEEE transactions on power electronics, 2014, 29(5): 2289-2295.

[12] STROEBEL-MAIER H, STREIBEL A, OLESEN K, et al. ShowerPower® 3D-highest power density for future generation of SiC power modules[C]//VDE. PCIM Europe 2022: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nuremberg: VDE, 2022: 1-6.

[13] 张嘉伟, 曾正, 孙鹏, 等. 基于响应面的车用功率模块 Pin-Fin 优化设计[J]. 电工技术学报, 2022, 37(22): 5836-5850.
ZHANG Jiawei, ZENG Zheng, SUN Peng, et al. Optimized pin-fin design of power module for electric vehicle application by response surface[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2022, 37(22): 5836-5850.

[14] SHARAR D J, JANKOWSKI N R, MORGAN B. Thermal performance of a direct-bond-copper aluminum nitride manifold-microchannel cooler[C]//IEEE. 2010 26th Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. Santa Clara: IEEE, 2010: 68-73.

[15] LIN Y, WEI Tiwei, MOY W J, et al. Multi-level embedded three-dimensional manifold microchannel heat sink of aluminum nitride direct bonded copper for the high-power electronic module[J]. Journal of electronic packaging, 2023, 146 (1): 011006.

[16] ZHANG Xiaobin, ZHAO Xiaoliang, LI Wei, et al. Ultra-thermostable embedded liquid cooling in SiC 3D packaging power modules of electric vehicles[J]. Energy conversion and management, 2023, 276: 116499.

[17] BOTELER L M, NIEMANN V A, URCIUOLI D P, et al. Stacked power module with integrated thermal management [C]//IEEE. 2017 IEEE International Workshop On Integrated Power Packaging. Delft: IEEE, 2017: 1-5.

[18] MA Dingkun, XIAO Guochun, ZHANG Tongyu, et al. A highly integrated multichip SiC MOSFET power module with optimized electrical and thermal performances[J]. IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, 2023, 11(2): 1722-1736.

[19] MORENO G, NARUMANCHI S, TOMERLIN J, et al. Single-phase dielectric fluid thermal management for power-dense automotive power electronics[J]. IEEE transactions on power electronics, 2022, 37(10): 12474-12485.

[20] VASILIEV L, LOSSOUARN D, ROMESTANT C, et al. Loop heat pipe for cooling of high-power electronic components[J]. International journal of heat and mass transfer, 2009, 52(1/2): 301-308.

[21] SINGH R, NGUYEN T. Loop heat pipes for thermal management of electric vehicles[J]. Journal of thermal science and engineering applications, 2022, 14(6): 061010.

[22] HUHMAN B M, BOSWELL J, MA Hongbin, et al. Evaluation of the efficacy of oscillating heat pipes for pulsed power naval applications[J]. Naval engineers journal, 2015, 127(1): 75-81.

[23] BURBAN G, AYEL V, ALEXANDRE A, et al. Experimental investigation of a pulsating heat pipe for hybrid vehicle applications[J]. Applied thermal engineering, 2013, 50(1): 94-103.

[24] CHEN Hao, LI Qiang. Experimental study of a novel heat sink for distribution level static synchronous compensator cooling[J]. Science China technological sciences, 2020, 63 (9): 1764-1775.

[25] XIAHOU Guowei, MA Rui, ZHANG Junjie, et al. Thermal performance of an array condenser flat heat pipe for IGBT heat dissipation[J]. Microelectronics reliability, 2020, 104: 113546.

[26] WANG Binyu, WANG Laili, YANG Fengtao, et al. Air-cooling system optimization for IGBT modules in MMC using embedded O-shaped heat pipes[J]. IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, 2021, 9 (4): 3992-4003.

[27] 黄南, 温志强, 荣智林, 等. VC 技术在半导体热管理应用的性能研究[J]. 现代电子技术, 2022, 45(7): 143-147.
HUANG Nan, WEN Zhiqiang, RONG Zhilin, et al. Research on application performance of VC technology in semiconductor thermal management[J]. Modern electronics technique, 2022, 45(7): 143-147.

[28] CHEN Yiyi, LI Bo, WANG Xuehui, et al. Direct phase-change cooling of vapor chamber integrated with IGBT power electronic module for automotive application[J]. IEEE transactions on power electronics, 2021, 36(5): 5736-5747.

[29] CHEN Yiyi, LI Bo, WANG Xin, et al. Investigation of heat transfer and thermal stresses of novel thermal management system integrated with vapour chamber for IGBT power module[J]. Thermal science and engineering progress, 2019, 10: 73-81.

[30] WANG Binyu, WANG Laili, WU Shijie, et al. An evaluation on thermal performance improvements for SiC power module integrated with vapor chamber in MMC[J]. IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, 2022, 10(5): 5214-5225.

[31] MU Wei, WANG Laili, WANG Binyu, et al. Direct integration of optimized phase-change heat spreaders into SiC power module for thermal performance improvements under high heat flux[J]. IEEE transactions on power electronics, 2022, 37(5): 5398-5410.

[32] OSMAN A, MORENO G, MYERS S, et al. Single-phase jet impingement cooling for a power-dense silicon carbide power module[J]. IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2023, 13(5): 615-627.

[33] WEI Tiwei, OPRINS H, CHERMAN V, et al. High-

efficiency polymer-based direct multi-jet impingement cooling solution for high-power devices[J]. IEEE transactions on power electronics, 2019, 34(7): 6601-6612.

[34] WEI Tiwei, OPRINS H, CHERMAN V, et al. Experimental characterization of a chip-level 3D printed microjet liquid impingement cooler for high-performance systems[J]. IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2019, 9(9): 1815-1824.

[35] GOULD K, CAI S Q, NEFT C, et al. Liquid jet impingement cooling of a silicon carbide power conversion module for vehicle applications[J]. IEEE transactions on power electronics, 2015, 30(6): 2975-2984.

[36] JÖRG J, TARABORRELLI S, SARRIEGUI G, et al. Direct single impinging jet cooling of a mosfet power electronic module[J]. IEEE transactions on power electronics, 2018, 33 (5): 4224-4237.

[37] ZAMAN M S, MICHALAK A, NASR M, et al. Multiphysics optimization of thermal management designs for power electronics employing impingement cooling and stereolithographic printing[J]. IEEE transactions on power electronics, 2021, 36(11): 12769-12780.

[38] VLADIMIROVA K, CREBIER J C, AVENAS Y, et al. Drift region integrated microchannels for direct cooling of power electronic devices: advantages and limitations[J]. IEEE transactions on power electronics, 2013, 28(5): 2576-2586.

[39] HARPOLE G M, ENINGER J E. Micro-channel heat exchanger optimization[C]//IEEE. 1991 Proceedings, Seventh IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium. Phoenix: IEEE, 1991: 59-63.

[40] SHI Miao, YU Xiaoling, TAN Youbo, et al. Thermal performance of insulated gate bipolar transistor module using microchannel cooling base plate[J]. Applied thermal engineering, 2022, 201(Part A): 117718.

[41] VAN ERP R, KAMPITSIS G, MATIOLI E. Efficient microchannel cooling of multiple power devices with compact flow distribution for high power-density converters[J]. IEEE transactions on power electronics, 2020, 35(7): 7235-7245.

[42] LALOYA E, LUCÍA Ó, SARNAGO H, et al. Heat management in power converters: from state of the art to future ultrahigh efficiency systems[J]. IEEE transactions on power electronics, 2016, 31(11): 7896-7908.

[43] ZHANG Nan, JIAO Binbin, YE Yuxin, et al. Embedded cooling method with configurability and replaceability for multi-chip electronic devices[J]. Energy conversion and management, 2022, 253: 115124.

[44] HODES M, ZHANG Rui, LAM L S, et al. On the potential of Galinstan-based minichannel and minigap cooling[J]. IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2014, 4(1): 46-56.

[45] YERASIMOU Y, PICKERT V, JI Bing, et al. Liquid metal magnetohydrodynamic pump for junction temperature control of power modules[J]. IEEE transactions on power electronics, 2018, 33(12): 10583-10593.

[46] YANG Tianyu, FOULKES T, KWON B, et al. An integrated liquid metal thermal switch for active thermal management of electronics[J]. IEEE transactions on components, packaging and manufacturing technology, 2019, 9(12): 2341-2351.

[47] SHAO Weihua, WU Ruizhu, RAN Li, et al. A power module for grid inverter with in-built short-circuit fault current capability[J]. IEEE transactions on power electronics, 2020, 35 (10): 10567-10579.

[48] REN Hai, SHAO Weihua, RAN Li, et al. A phase change material integrated press pack power module with enhanced overcurrent capability for grid support-a study on FRD[J]. IEEE transactions on industry applications, 2021, 57(4): 3956-3968.

[49] HAO Gaofeng, ZHOU Lin, LI Haixiao, et al. A SSSC protection scheme based on thyristor integrate with phase change material[J]. International journal of heat and mass transfer, 2022, 186: 122516.

[50] JIANG Huaping, WEI Jingfeng, FANG Xin, et al. A ΔT_j reduced power module with inbuilt phase change material for reliability enhancement[J]. IEEE transactions on electron devices, 2021, 68(9): 4557-4564.

[51] TANG Weiyu, LI Junye, LU Junliang, et al. Transient thermal management of SiC power modules by an in-built thermal buffer layer[C]//IEEE. 2022 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo. Haining: IEEE, 2022: 1-4.

[52] BARNES C M, TUMA P E. Practical considerations relating to immersion cooling of power electronics in traction systems[J]. IEEE transactions on power electronics, 2010, 25 (9): 2478-2485.

[53] WANG Yanan, REN Linyuan, YANG Zihao, et al. Application of two-phase immersion cooling technique for performance improvement of high power and high repetition avalanche transistorized subnanosecond pulse generators[J]. IEEE transactions on power electronics, 2022, 37(3): 3024-3039.

[54] HOU Fengze, ZHANG Hengyun, HUANG Dezhu, et al. Microchannel thermal management system with two-phase flow for power electronics over 500 W/cm^2 heat dissipation [J]. IEEE transactions on power electronics, 2020, 35(10): 10592-10600.

[55] ARANZABAL I, DE ALEGRÍA I M, DELMONTE N, et al. Comparison of the heat transfer capabilities of conventional single- and two-phase cooling systems for an electric vehicle IGBT power module[J]. IEEE transactions on power electronics, 2019, 34(5): 4185-4194.

收稿日期：2023-08-01
修回日期：2023-08-28