

高密度集成收发组件热电协同设计

朱啸宇 李 伟 胡梦婕
(南京电子设备研究所, 南京 210007)

摘要 近年来, 有源相控阵雷达在尺寸、质量和功率密度等方面的要求越来越高, 收发组件的体积、功率、散热等面临更大的挑战。本文提出一种高密度集成收发组件热电协同设计方案, 设计出一款高导热、高输出功率、高集成度的系统级封装, 实现了收发组件的收发前端功能, 并在组件中验证了其性能。

关键词: 收发组件; 热电协同设计; 高导热; 高集成度; 系统级封装 (SIP)

Thermal-electric co-design of high density integrated transmitter and receiver components

ZHU Xiaoyu LI Wei HU Mengjie
(Nanjing Electronic Equipment Research Institute, Nanjing 210007)

Abstract In recent years, active phased array radar has imposed increasingly demanding requirements in aspects such as size, weight, and power density, presenting considerable challenges to the volume, power, and heat dissipation of the transmitter and receiver components. This paper proposes a thermal-electric co-design scheme for high density integrated transmitter and receiver components and designs a system in package with high efficiency heat dissipation, high output power, and high integration to achieve the transmitter and receiver front-end functions of the components which has been verified in the components.

Keywords: transmitter and receiver components; thermal-electric co-design; high efficiency heat dissipation; high integration; system in package (SIP)

0 引言

有源相控阵雷达作为一种先进的雷达技术^[1-2]被广泛应用在各个领域, 其功能日益复杂, 功率密度越来越高^[3]。收发 (transmitter and receiver, TR) 组件是有源相控阵雷达的关键部件之一, 对 TR 组件的小型化、高集成度和高功率需求越来越多。

当前, TR 组件主要有砖式组件和瓦片式组件两种形式。传统砖式 TR 组件^[4]采用纵向布局、横向组装的形式, 以微组装工艺为主, 集成度低, 体积大。瓦片式 TR 组件^[5]采用横向布局、纵向组装的形式, 可将组件的复杂电路通过系统级封装 (system in package, SIP) 技术^[6]和三维异构技术^[7]进行高密度集成, 将 SIP 模组通过表面贴装技术 (surface mounted technology, SMT) 工艺进行板级集成^[8], 最后实现组件与天线的垂直互联。瓦片式 TR 组件具

有更高的集成度和电路复杂度, 通常采用陶瓷封装来实现 SIP, 但陶瓷材料导热系数低, 散热能力差, 无法满足大功率氮化镓 (GaN)^[9]器件的散热需求及 TR 组件的高功率密度需求。

为了满足瓦片式 TR 组件的高功率需求并保证高集成度, 本文提出一种高密度集成 TR 组件的热电协同设计方法, 设计一款兼具高集成度和高热导的收发前端 SIP 来实现瓦片式 TR 组件。该 SIP 采用高温共烧厚膜陶瓷 (high temperature co-fired ceramics, HTCC)^[10]工艺加工陶瓷封装, 以实现 X/Ku 波段的收发切换、发射通道输出功率 10W 等指标, 并在瓦片式 TR 组件中对该 SIP 进行验证。

1 TR 组件收发前端 SIP 设计

1.1 方案设计

收发前端电路是 TR 组件的关键组成部分, 作

为直接与天线互联的电路,直接影响 TR 组件接收通道的接收灵敏度、接收增益和发射通道的输出功率、效率等关键指标,对雷达收发系统的性能起着关键作用。常规收发前端电路的原理框图如图 1 所示,电路主要由开关、限幅器、滤波器、低噪声放大器(low-noise amplifier, LNA)、功率放大器(power amplifier, PA)和电源调制芯片等器件组成,可根据组件需求灵活加入数控衰减器、温度补偿器等器件。

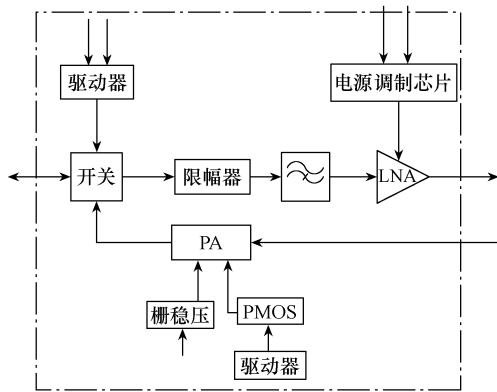


图 1 收发前端电路原理框图

本文基于 X/Ku 波段 TR 组件的广泛应用需求和性能要求,设计一款高导热、高功率输出、高集成度的收发前端 SIP,电性能指标要求见表 1。

表 1 收发前端 SIP 电性能指标要求

指标	数值
频率 f/GHz	8~18
接收增益 G_R/dB	≥ 18
接收噪声系数 N_F/dB	≤ 5.5
接收最大输入功率 P_{max}/W	≥ 5
接收输入功率 P_1/dBm	≥ -25
发射输出功率 P_T/dBm	≥ 40
发射峰值动态电流 I_d/A	≤ 3.5

收发前端 SIP 具备以下功能:①收发通道快速切换功能;②接收通道增益放大功能;③发射通道功率放大功能;④+5V 电源调制功能;⑤栅极负稳压功能;⑥+28V 电源调制功能;⑦负电保护功能,对放大器进行保护。

将设计指标分为接收通道和发射通道分别进行分解。接收通道指标主要为接收小信号增益和噪声系数,接收通道噪声系数计算公式为

$$N_F = N_{F1} + \frac{N_{F2} - 1}{G_1} + \frac{N_{F3} - 1}{G_1 G_2} + \dots \quad (1)$$

式中: N_F 为系统总噪声系数; N_{F1} 为第一级器件噪

声系数; G_1 为第一级器件的增益,以此类推。选取低插入损耗的开关、滤波器和限幅器芯片,以及低噪声系数、高增益的低噪声放大器是降低组件噪声系数的主要手段。

发射通道核心指标为饱和输出功率和功耗,因此在功率放大器芯片输出功率满足使用需求的同时应尽量提高芯片附加效率^[11]。

根据以上设计规则,选择大功率氮化镓开关作为收发切换开关,相比砷化镓(GaAs)芯片,其具有更大的耐功率、更高的功率压缩点和更低的插入损耗;发射通道的功率放大器选择氮化镓放大器,可以满足高输出功率和高附加效率等需求。收发前端 SIP 具体链路设计如图 2 所示,电性能设计指标见表 2。设计值均符合要求。

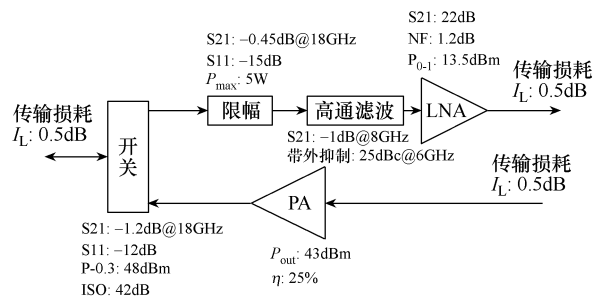


图 2 收发前端 SIP 链路设计

表 2 收发前端 SIP 电性能设计指标

指标	数值
频率 f/GHz	8~18
接收增益 G_R/dB	19
接收噪声系数 N_F/dB	4.5
接收最大输入功率 P_{max}/W	5
接收输入功率 P_1/dBm	≥ -4.5
发射输出功率 P_T/dBm	≥ 40
发射峰值动态电流 I_d/A	≤ 3

1.2 收发前端 SIP 电设计

由于收发前端 SIP 内部功能复杂,且具有较高的散热需求,对 SIP 提出了很高的要求,这也导致当前很少有高功率、多功能模组的封装产品。本文综合考虑收发前端电路功能需求,以及封装尺寸等因素,基于 HTCC 工艺设计一款尺寸为 12mm×12mm×2.2mm 的方形扁平无引脚封装管壳(quad flat no-lead package, QFN),可以满足散热和电磁兼容等需求^[12]。封装采用侧壁半孔的设计形式,即在管壳侧壁加工半圆弧射频传输结构,使射频信号在侧壁

半孔、带状线和共面波导三种过渡结构中传输，将封装底部引脚的射频信号传输至 SIP 内部，可满足频率 20GHz 以内的使用需求。考虑 Ku 频段金丝的寄生电感效应，在 SIP 内排布芯片区域的四周放置一圈 0.15mm 厚度的陶瓷环，并在该陶瓷环上布线，与芯片金丝互联，以减少金丝长度。封装传输结构仿真模型如图 3 所示，散射参数仿真结果如图 4 所示。

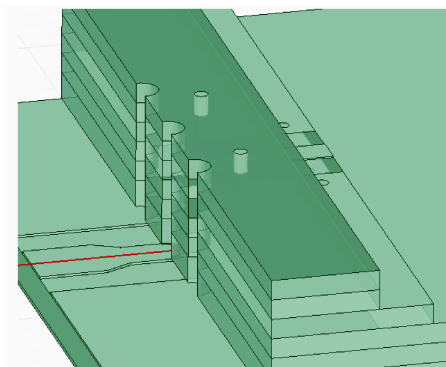


图 3 封装传输结构仿真模型

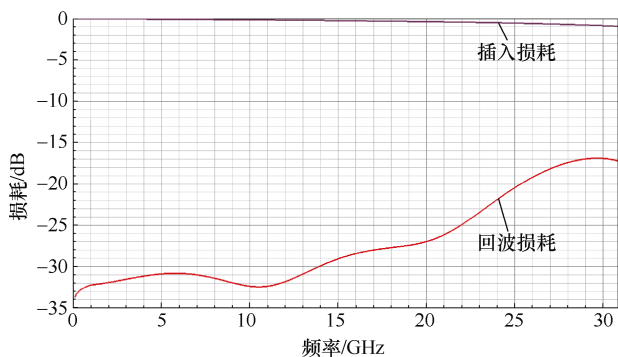


图 4 散射参数仿真结果

由仿真结果可知，回波损耗在 20GHz 为 -27dB，插入损耗在 20GHz 为 -0.37dB，射频性能优异，满足收发前端 SIP 的使用需求。

在完成陶瓷封装电设计后，将 GaN 开关、GaN 功率放大器、GaAs 低噪声放大器、限幅器、PMOS 等十余种芯片在 SIP 内进行排布，芯片之间通过陶瓷微带进行互联。收发前端 SIP 内部器件清单见表 3。

表 3 收发前端 SIP 内部器件清单

编号	器件名称
S1	GaN 开关
A1	限幅器
A2	低噪声放大器
A3	GaN 功率放大器
Z1	滤波器

(续表 3)

编号	器件名称
Z2	固定衰减器
N1	栅稳压芯片
N2	PMOS 驱动器
N3	PMOS
N4	开关驱动器
N5	电源调制芯片
R1	芯片电阻
C1	1 000pF 电容
C2	100pF 电容

1.3 收发前端 SIP 热设计

该设计方案选用的功率放大器芯片效率约为 25%，当输出功率为 20W 时，所产生的热耗约为 60W。同时，GaN 开关、限幅器及 PMOS 在传输大功率信号或大电流时，由于器件自身损耗或内阻将产生较大热耗。热量堆积会显著影响功率放大器芯片性能，导致信号失真增加、输出功率大幅降低，同时加速元器件老化、降低热稳定性和结构稳定性^[13-14]。因此，采取有效措施优化 SIP 的散热能力，对于确保系统长期稳定运行至关重要。

SIP 采用 HTCC 工艺加工管壳具有诸多优势，能满足高可靠性、高集成度等应用需求，但氧化铝陶瓷基板的导热系数较低 (15~35W/(m·K))，通过选用金属载板嵌入陶瓷基板来提高散热性能。综合考虑导热系数及热膨胀系数等因素，选用铜/钼-铜/铜 (Cu/Mo-Cu/Cu, CMCC) 作为载板材料。CMCC 是目前常用的金属热沉之一，用三层金属构成独特的“三明治”结构，通过调配各金属层厚度的比例可以得到所需求的导热系数和热膨胀系数。该 SIP 管壳选择 CMCC 材料比例为 1:4:1，导热系数为 210W/(m·K)，热膨胀系数为 $8.8 \times 10^{-6}/K$ ，与氮化镓、砷化镓等芯片相匹配^[15]，具体封装结构如图 5 所示，在氧化铝陶瓷上放置可伐框，方便后续 SIP 实现气密封装。

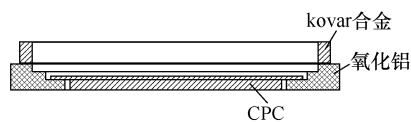


图 5 封装结构

由于单个 SIP 的热耗高、热容小，仅提高 SIP 的导热系数是不够的，还需组件配合进行热设计。因此，为保证 SIP 产生的热量快速传递到组件结构

壳体, 须尽可能减少印制电路板 (printed circuit board, PCB) 的热阻^[16], 在 SIP 底部的微波多层板内埋紫铜材料, 通过引入导热系数更高的铜层作为热传导介质, 可以显著优化传热路径、有效降低热阻, 从而提高 TR 组件的散热效率。除自然对流的散热方式以外, TR 组件通常还会采用液冷板作为主动散热解决方案, 通过液冷板内部循环的冷却工质来吸收并带走大量的热量, 满足其严格的散热需求^[17-18]。

金锡焊料作为高性能焊接材料, 具有高强度、高导热系数及无需助焊剂等特点, 适用于高功率器件的共晶焊接。本文选用的金锡焊料导热系数为 $55\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 可满足焊接质量和稳定性要求, 并提高器件的散热性能和可靠性, 利用该焊料将功率放大器功率器件烧结至 CMCC 载板上。综合考虑 SIP 的尺寸、功率消耗和散热需求, 设计热传导路径, 各层导热材料特性参数见表 4。

表 4 导热材料特性参数

序号	名称	材料	尺寸/ (mm×mm×mm)	导热系数/ [W/(m·K)]
1	管芯区域	氮化镓	3×0.6×0.01	150
	功放芯片	碳化硅	4.1×3.4×0.08	350
2	金锡焊料	金锡焊料	7.9×7.9×0.1	55
3	金属热沉	CMCC	7.9×7.9×0.5	210
4	锡银铜焊料	锡银铜焊料	7.9×7.9×0.1	34
5	紫铜	紫铜	7.9×7.9×1	400
6	锡银铜焊料	锡银铜焊料	7.9×7.9×0.1	34
7	壳体	铝	12×12×4	200

为有效评估 SIP 和组件结构的散热性能、优化冷却液流动路径及评估功率芯片的结温, 运用 COMSOL Multiphysics 中的流体流动模块和传热模块进行数值模拟。通过将流体流动和热传导相互耦合的方式进行仿真分析, 将功率放大器作为恒定热源, 其热耗集中分布在末级放大器管芯区域, 另有开关芯片及部分无源结构。采用水作为冷却介质, 流速设置为 2m/s , 环境温度设置为 20°C 。使用 COMSOL 自带的网格划分工具对模型进行网格剖分, 并对热源附近及各交界面进行网格细化, 使用稳态求解器获取 SIP 稳定工作状态下的温度分布。通过对热传导路径结构进行优化设计, 温度最高区域位于管芯区域, 最高温度为 110°C , 远低于 GaN 芯片允许的最高结温 225°C , 这表明在正常工作条件下, 该封装结构及组件应用结构能够有效地将管

芯区域产生的热量散发出去, 满足 SIP 及 TR 组件对高效散热的需求, 确保组件在长时间高负荷运行下的稳定性和可靠性。热仿真结果如图 6 所示。

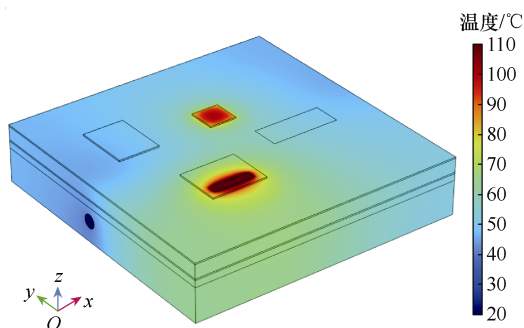


图 6 热仿真结果

2 收发前端 SIP 验证及应用

2.1 收发前端 SIP 验证

通过微组装工艺对收发前端 SIP 进行装配, 收发前端 SIP 实物如图 7 所示。验证实验使用信号源、功率计、衰减器、矢量网络分析仪及 Socket 无损测试架^[19]对收发前端 SIP 进行测试, 接收通道为连续波工作条件, 发射通道为脉冲工作, 周期 1ms , 占空比 10%。接收通道测试数据如图 8 所示, 发射饱和和输出功率测试数据如图 9 所示。

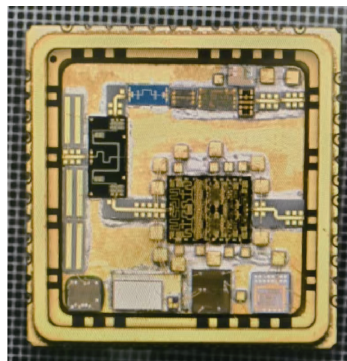


图 7 收发前端 SIP 实物

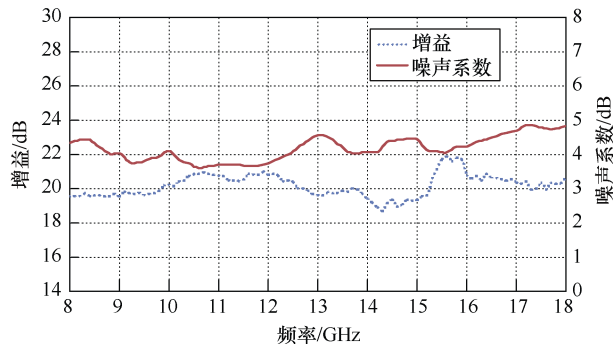


图 8 接收通道测试数据

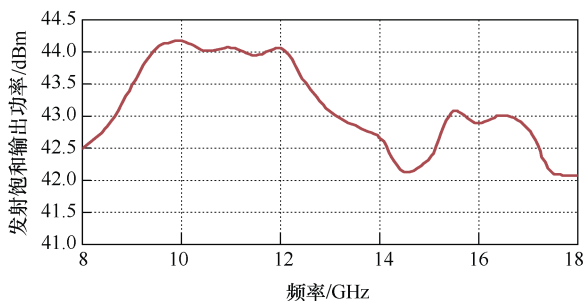


图9 发射饱和输出功率测试数据

由测试曲线可知,在8~18GHz频段内,接收增益均大于18dB,噪声系数均小于5dB,18GHz附近噪声系数指标接近临界值,分析其原因为高频段管壳、金丝和微带线等传输损耗增加;发射输出功率均大于42dBm,在14~15GHz左右有明显下降,分析其原因为该频段内,功率放大器与开关、管壳等级联器件匹配较差,导致功率下降1dB~1.5dB。综上所述,收发前端SIP的核心指标均满足表1中的指标要求,且与表2的设计理论值基本相符。

2.2 TR组件性能验证

为了对收发前端SIP在TR组件中的应用情况进行验证,按照本文的热设计结果对组件的结构件和微波多层板进行设计,结构件选用材料铝,微波多层板为微波射频基板和高温数字板混压而成,并在SIP主要散热区域埋入紫铜,发射输出端接口选用微型插拔接头(subminiature push-on, SMP),发射输入端和接收输出端采用射频探针作为端口。

组件装配流程:①将收发前端SIP烧结至微波多层板;②微波多层板烧结至结构壳体上;③在收发前端SIP加电端口放置合适的滤波电容和储能电容。接收通道为连续波工作条件,发射通道为脉冲工作,周期1ms,占空比10%。SIP验证组件实物如图10所示,组件饱和输出功率脉冲测试数据如图11所示,接收通道测试数据如图12所示。

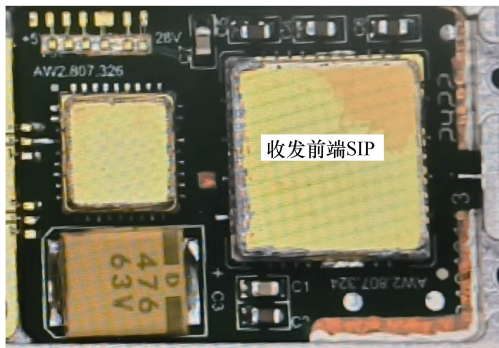


图10 SIP验证组件实物

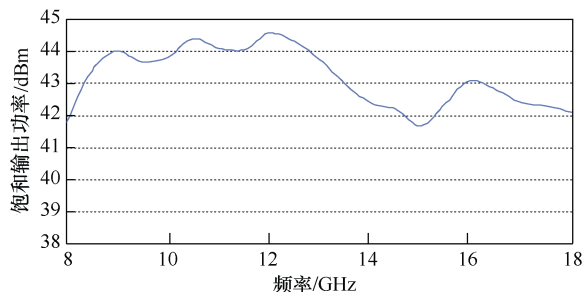


图11 组件饱和输出功率脉冲测试数据

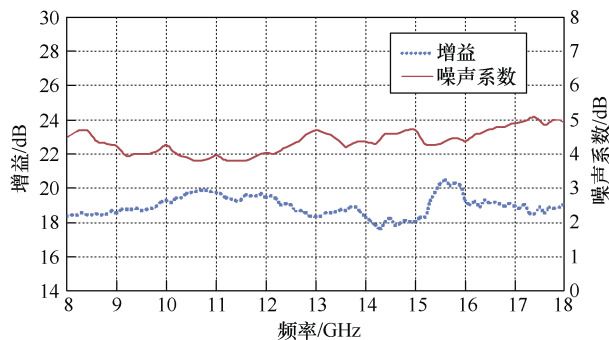


图12 组件接收通道测试数据

由测试曲线可知,在8~18GHz频段内,接收增益均大于17.5dB,噪声系数均小于5.5dB,发射输出功率均大于41.5dBm,与收发前端SIP相比,组件性能未出现明显恶化。

为了验证热仿真设计结果,对组件的发射通道进行连续波测试。为了模拟液冷板效果,在组件底部放置散热工装,并在组件散热区域涂覆导热硅脂、外部增加风扇进行辅助散热。

连续波测试数据如图13所示。由测试结果可知,在连续波测试条件下放大器芯片产生的热耗极大,组件温度明显上升,导致输出功率下降1dB~2dB,但是8~18GHz频段内输出功率仍大于40dBm,且组件工作稳定,连续工作10min功率无明显波动。这一结果证明该收发前端SIP及TR组件结构可以有效提升瓦片式TR组件的散热能力,满足相控阵雷达高功率密度TR组件的使用需求。

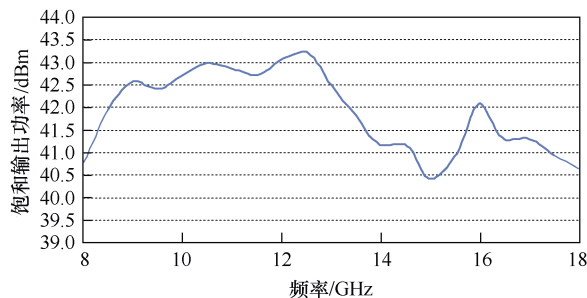


图13 组件饱和输出功率连续波测试数据

3 结论

针对有源相控阵雷达的高集成、高功率密度等需求,本文提出了一种高密度集成 TR 组件的热电协同设计方法,设计了一款高导热、高输出功率、高集成度的系统级封装,实现了收发组件的收发前端功能,并通过测试验证了 SIP 性能及其在组件中的应用情况。测试数据表明,该收发前端 SIP 性能优异,各项指标符合预期,同时 TR 组件可以在连续波工作条件下稳定工作,说明该设计方案既能保证收发前端 SIP 的集成度,又能提高瓦片式 TR 组件的散热能力,可适用于高集成度、高功率密度的 TR 组件。

参考文献

- [1] 张光义,赵玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [2] 田勇,杨昊,胡超,等. 基于毫米波雷达的电动汽车无线充电运动异物检测与跟踪[J]. 电工技术学报, 2023, 38(2): 297-308.
- [3] 黄裕年,刘淑英. 有源电子扫描阵列雷达与高功率微波武器[J]. 信息与电子工程, 2006, 4(5): 321-325.
- [4] 王洁,武华锋,李宁,等. 一种 4GHz 瞬时带宽的 6~18GHz 超宽带 T/R 组件设计[J]. 电子科技, 2024, 37(8): 97-102.
- [5] 余雷,揭海,周丽,等. S-C 波段大功率瓦片式 T/R 组件的设计与实现[J]. 电子工艺技术, 2022, 43(4): 200-203.
- [6] 陈一泉,张江华,李宗怿,等. 系统级封装技术及其应用[J]. 中国集成电路, 2009, 18(12): 56-62.
- [7] 季宏凯,王蕴玉,刘元昆,等. TSV 三维微系统封装微波特性研究[J]. 电子技术与软件工程, 2020(19): 95-97.
- [8] 卢立东,安华,黎娜,等. QFN 器件的组装工艺[J]. 电子工艺技术, 2021, 42(3): 158-162.
- [9] 杨帆,王美琪,关卫省. III族氮化物半导体材料的制备及应用研究进展[J]. 人工晶体学报, 2019, 48(7): 1203-1207.
- [10] 彭博,高岭,刘林杰,等. 高温共烧陶瓷微流道工艺特性[J]. 半导体技术, 2023, 48(5): 443-447.
- [11] 高贵虎,苏凯雄,范梦怡. 北斗导航射频功率放大器设计[J]. 电气技术, 2018, 19(12): 53-56.
- [12] 赵玉虎,明正峰,韩彬彬. 功率变换电路电磁兼容建模及抑制方法[J]. 电气技术, 2022, 23(7): 7-17.
- [13] 胡震,崔曼,吴晓华,等. 功率器件结温主动控制及优化策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(18): 5732-5741.
- [14] 崔曼,胡震,张腾飞,等. 基于壳温信息的功率器件可靠性分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(24): 6760-6767.
- [15] 韩胜利,宋月清,崔舜,等. 新型低膨胀 Mo-Cu 合金电子封接材料研究[J]. 粉末冶金技术, 2009, 27(3): 189-192.
- [16] 贾京,冯士维,邓兵,等. 基于热阻测量的 PCB 散热特性[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 239-244.
- [17] 朱婷,张雨晴,李强,等. 高功率密度电机混合型散热技术综述[J]. 电气技术, 2022, 23(8): 1-16, 52.
- [18] 漫自强,刘欢,刘腾. 风冷型及水冷型静止变频器设备对比研究[J]. 电气技术, 2022, 23(7): 69-73.
- [19] 李明磊,乔志壮,刘林杰,等. 应用于射频 BGA 外壳的无损测试夹具研发[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(15): 120-126.

收稿日期: 2024-08-06

修回日期: 2024-10-26

作者简介

朱啸宇(1994—),男,硕士,研究方向为射频微系统及先进封装设计。