

一种星载大功率 T/R 组件的高密度组装技术^①

王杨婧^{1,2}, 秦绪嵘¹, 冯小晶¹, 张成果¹, 谢拥军²

(1. 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000;

2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要:随着卫星应用技术的发展,相控阵天线在卫星上的应用越来越广泛,T/R组件作为有源相控阵天线最核心的部分,直接决定了相控阵天线的性能,而卫星载荷宇航级的应用,又对T/R组件提出了需要同时具备高功率、高集成和高可靠性等更加严苛的要求。提出了一种星载大功率T/R组件的高密度组装技术,从结构特点、热仿真、可制造性等方面详细介绍了其工艺设计与实现过程,并对关键工艺和过程控制措施进行了详述,通过多级焊接解决了该T/R组件多通道大功率芯片的散热问题,最终给出了实物照片和测试结果。该高密度组装技术的攻关与验证成功,为高功率、高可靠、高性能星载T/R组件的批产提供了工艺基础。

关键词:T/R组件;大功率;星载;组装技术

中图分类号:V416

文献标识码:A

文章编号:1674-7135(2021)06-0075-05

DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2021.06.012

High density assembly technology of high-power T/R module for satellite

WANG Yangjing^{1,2}, QIN Xurong¹, FENG Xiaojing¹, ZHANG Chengguo¹, XIE Yongjun²

(1. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710000, China;

2. Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: With the development of satellite application technology, phased array antenna is more and more widely used in satellite. T/R module is the core part of active phased array. The performance of phased array antenna is directly determined. The application of space-class on satellite brings more stringent requirements to T/R module, such as high power, high integration and high reliability. This paper introduced a high-density assembly technology for spaceborne high-power T/R module. Combining the structural characteristics of the product, thermal simulation analysis and manufacturability, etc., its process plan and realization process are given. Detailed description of key processes and process control measures. The thermal dissipation problem of the multi-channel high power chips is solved by multi-stage welding. Finally, photo and test results are given at the end. The successful research and verification of the high-density assembly technology provides a process basis for the mass production of high-power, high reliability and high-performance spaceborne T/R modules.

Key words: T/R module; high-power; satellite; assembly technology

0 引言

应用于星载相控阵天线中的T/R组件,正如其在地面和机载平台应用一样,经历了基于混合微波集成电路的组件和单片微波集成电路组件两大阶

段,伴随着第一代硅(Si)、第二代砷化镓(GaAs)器件的成熟应用,高密度集成的多芯片组件(multichip module, MCM)封装模块,已成为现阶段有源相控阵的主流技术方案^[1-3]。然而,高轨通信卫星、高轨遥

① 收稿日期:2021-09-16;修回日期:2021-10-31。

作者简介:王杨婧(1987—),工程师,主要研究方向为混合封装。E-mail:wangyj5@cast504.com

控/遥测卫星、高轨 SAR 卫星等应用^[4-6],对核心器件的高功率、高效率、小型化和高击穿电压特性提出了新的需求^[7-8],已成熟使用的 GaAs 器件无法满足数倍增长的功率密度需求。随着第三代半导体材料氮化镓(GaN)技术逐步趋于成熟,其高能量带隙、高击穿场强、高射频密度、宽带、高偏压、高热导性等方面的优势逐步明显,可提供的功率密度比 GaAs 器件高十倍。因此,采用 GaN 器件的 T/R 组件将实现更大的输出功率、更高的效率和宽带性能优势,已在有源相控阵的 T/R 组件中获得应用^[9-11],并且在星载相控阵系统的应用极具优势。

本文通过实验,介绍了一款 4 通道 X 波段 50 W T/R 组件(简称 50 W T/R 组件)的高密度组装工艺,该组件以多级 GaN 芯片作为核心放大器芯片、辅助 GaAs 芯片、Si 芯片等控制、驱动或场效应管芯片的微波 MCM 技术^[12-13],可实现高功率、高集成度与高可靠性的卫星载荷需求。

1 组件设计

50 W T/R 组件具有收发放大、幅相控制、耦合定标、电源脉冲调制和幅相控制等功能,每个 T/R 组件内部包含四个通道,封装在统一的硅铝管壳内,结构形式如图 1 所示,组件内部的有源部分通过裸芯片实现,主要器件包括 Si 基环隔组件、GaN 功放芯片、GaN 驱放芯片、GaAs 限幅器芯片、GaAs 低噪放芯片、GaAs 幅相控制多功能芯片、GaAs 延时器芯片、Si 基电源驱动芯片、Si 基 PMOS 管芯片、阻容元件等;无源部分通过低温共烧陶瓷(low temperature co-fired ceramic,LTCC)基板和多层微波介质基板实现,且主要射频和低频控制走线均在多层微波介质基板中实现。

由于该 50 W T/R 组件中采用了多级放大器芯片,单通道峰值输出功率高达 57 W,平均热耗 65 W,且受相控阵系统的空间尺寸限制,需在单面开腔中实现高密度的射频与低频布局。结合结构、工艺、组装能力等因素,多层微波介质基板采用了开腔设计,将各级 GaN 放大器芯片进行嵌入式装配与管壳接触,提高散热能力;环隔组件与 SMP 端口采用 LTCC 基板,实现高隔离度的射频信号耦合器输出和耦合信号的合路。

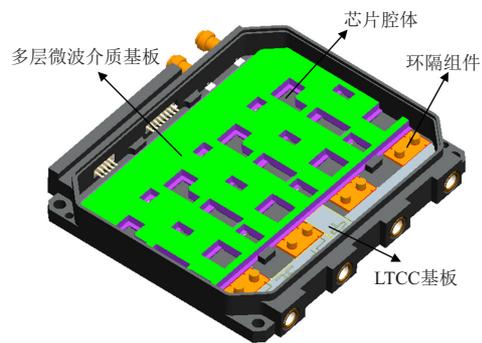


图 1 50 W T/R 组件结构形式

Fig. 1 Structure of the 50 W T/R module

其中,功耗最大的为末级 GaN 功放芯片和前级 GaN 驱放芯片,为了保证大功率 GaN 芯片可以实现良好的热传导,对两种 GaN 芯片按照全焊接的方案进行了热仿真。经过仿真计算,组件四个通道单只 GaN 功放芯片峰值热耗 60 W、结温 101.9 °C, GaN 驱放芯片结温 89.7 °C。另外,对其他功耗较大的芯片也进行了热仿真, GaAs 限幅器芯片和后端的 Si 基环隔组件,按照导电胶粘接的预案进行了热仿真,结温分别为 71.5 °C 和 97.2 °C,仿真结果如图 2 所示。根据仿真结果, GaN 芯片一级降额温度为 165 °C, GaAs 芯片一级降额温度为 110 °C,满足设计要求。

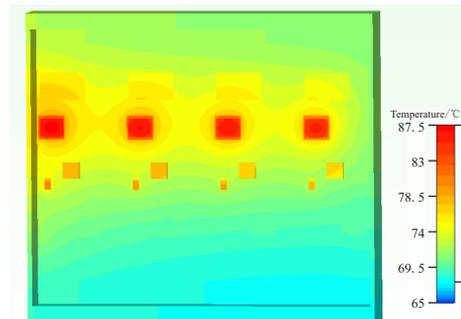


图 2 50 W T/R 组件热仿真结果

Fig. 2 Thermal simulation results of the 50 W T/R module

另外,由于该 50 W T/R 组件中包含了大量未封装裸芯片,为了提高产品的长期可靠性,采用了气密封装管壳结构;并且为了保证组装精度,管壳内部进行了限位结构设计,如图 3 所示。

考虑到实际组装过程中可能引入的各种不确定性因素,需要兼顾可实现性、可操作性与高可靠性来进行产品的工艺方案设计。

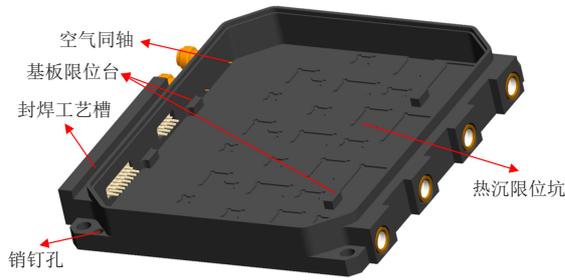


图 3 50 W T/R 组件管壳的结构设计

Fig.3 Housing structure of the 50 W T/R module

2 工艺设计与实现

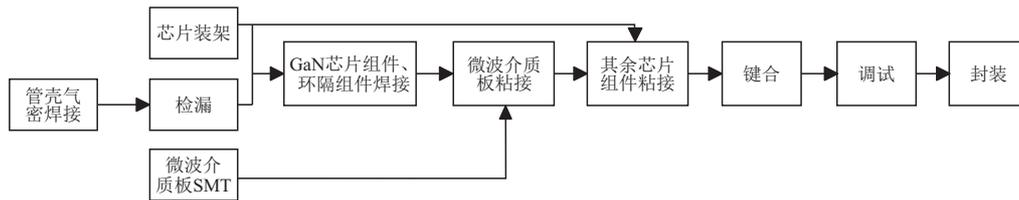
2.1 工艺方案设计

2.1.1 工艺路线

根据热仿真结果,该 50 W T/R 组件中 GaN 功放芯片、GaN 驱动芯片和环隔组件的功耗大,工作时结温较高,因此均需采用低热阻的焊接方式进行组装来实现良好的散热,保证两级 GaN 放大器芯片和

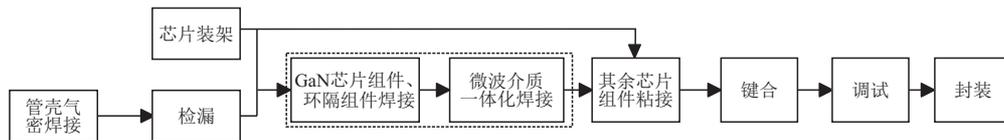
环隔组件能正常工作,避免热积累导致芯片烧毁;而其它 GaAs 芯片、Si 芯片、介质基板、LTCC 基板等,由于对散热没有严格的要求,既可采用粘接的方式,也可采用焊接的方式进行组装。

根据产品的结构与布局特点,多层微波介质基板和 LTCC 基板的组装具备两种实施方案:一是采用导电胶粘接的方式,二是采用焊接的方式进行组装。两种方案的共同要求均为低空洞,且两级 GaN 放大器芯片的空洞要求更为严苛(空洞率 $\leq 3\%$),以此来保证各通道热性能均匀性。两种方案的基本流程如图 4 所示,方案一:先焊接 GaN 芯片和环隔组件,然后再进行介质基板和 LTCC 基板的粘接,但由于基板面积较大且为开窗结构,存在胶液涂覆操作效率低、芯片焊接后的保护难度大的问题,组装效率低;方案二:先焊接基板、GaN 芯片和环隔组,然后再粘接其它 GaAs 芯片、Si 芯片等,但由于对空洞率要求极高,焊接过程控制是其关键,该方案组装效率较高。



(a) 方案一基本工艺流程

(a) Basic process flow chart of the scheme 1



(b) 方案二基本工艺流程

(b) Basic process flow chart of the scheme 2

图 4 50 W T/R 组装方案流程对比

Fig.4 The comparison of the two assembly processes for 50 W T/R module

从工艺流程的角度考虑,方案二比方案一的流程少,多层微波介质板 SMT 及其相关的清洗、检验、返修等工序均可以合并至一体化焊接工序,且大面积焊接比大面积粘接的可操作性更强;另一方面,该 50 W T/R 组件产品功率较大,基板采用焊接的方式能更好保证大功率芯片的热传导。因此本 50 W T/R 组件产品按照方案二来制定详细工艺方案。

2.1.2 工艺设计

由于该 50 W T/R 组件较为复杂,且功率密度

大,体积小,组装量大。主要分为 4 个部分:

1)管壳焊接。该 50 W T/R 组件的管壳材料为 Si50Al50,表面镀薄金(厚度 $\leq 0.5 \mu\text{m}$),采用金锡(Au80Sn20)焊料将外部连接器、SSMA、SMP 进行气密焊接。所选用材料与工艺均已在航天 MCM 产品中成熟应用。

2)芯片装架。该 50 W T/R 组件采用的多级放大器芯片,需要通过控制焊接空洞率来保证良好的散热。因此采用金锡焊料将芯片共晶焊接至钨铜热

沉上,同时需要严格控制功放芯片与驱放芯片热源区的空洞率 $\leq 3\%$ 。所选用材料与工艺均已在航天MCM产品中成熟应用。

3)射频与低频部分组装。射频与低频电路集成在多层微波介质板中,射频微波信号的良好传输对基板的大面积接地有一定要求,且不能影响管壳已焊接部分的气密性,因此采用铅锡(Sn63Pb37)焊料将基板、阻容元件进行真空回流焊接,保证基板焊接空洞率 $\leq 25\%$ 。射频部分除基板外,还需将装架后的芯片组件与管壳进行组装,为保证功放芯片、驱放芯片与环隔组件的有效散热,这三种芯片采用铅锡焊料进行真空回流焊接,且需要保证焊接空洞率 $\leq 10\%$;其余组件均采用导电胶粘接的方式进行组装,各装入件之间的电气互联通过金丝或金带键合实现。

4)气密封装。采用激光封焊的方式进行气密封装,该工艺方法已在航天MCM产品中成熟应用。

2.2 关键工艺控制与实现

该50 W T/R组件的关键工艺过程为基板与芯片组件焊接,关键点为焊接空洞的控制,因此投产验证样件进行了验证试验,以此来确定细节的实施方案与焊接曲线。基板及其上阻容、功放芯片组件、驱放芯片组件、环隔组件均采用铅锡(Sn63Pb37)焊

料进行焊接,且需要在保证管壳已焊接部分可靠性的同时,完成芯片组件和基板焊接的低空洞率和高质量的焊接。因此采取了以下措施进行过程控制:

1)对管壳上各焊接区域进行激光刻线^[14],保证回流焊接时各部分的焊锡不粘连,避免焊料堆积造成短路;

2)结合焊料特性^[15]、产品结构特点以及元器件耐热情况,采用多点测温的方式来进行回流焊接的温度参数设置,如图5所示。

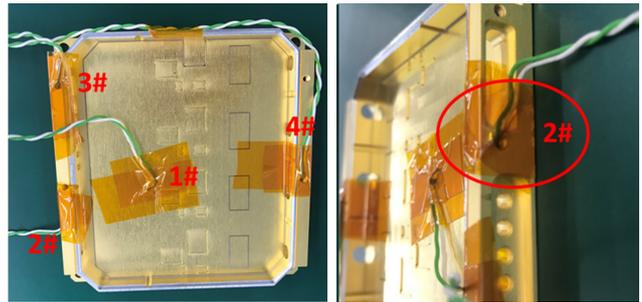


图5 50 W T/R 试验样件点温测试

Fig. 5 Point temperature test of the 50 W T/R sample

经过多次回流焊接温度实测,最终确定了基板的焊接工艺参数,焊接曲线如图6所示。



图6 50 W T/R 试验样件焊接曲线

Fig. 6 The welding curve of the 50 W T/R sample

对焊接后的样件进行了X光检测,如图7所示,各组件焊接空洞率均满足要求。

3)焊接完成后的清洗,采用多次雾化清洗结合

高温烘烤的方式,保证助焊剂完全清洗彻底,避免助焊剂残留影响裸芯片的可靠性。

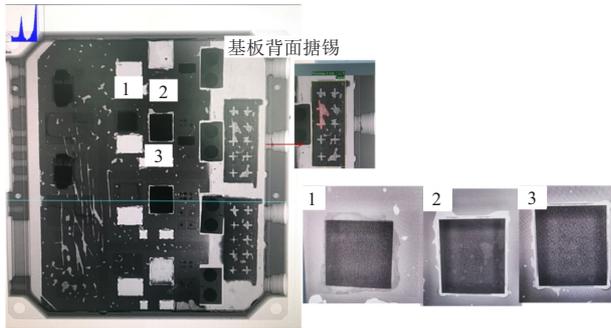


图7 50 W T/R 试验样件焊接结果

Fig. 7 The welding results of the 50 W T/R sample

3 实物及测试

按照以上工艺方案对 50 W T/R 组件产品进行了组装,实物图如图 8 所示,尺寸 74.3 mm × 76.9 mm × 11 mm,重量约 130 g。

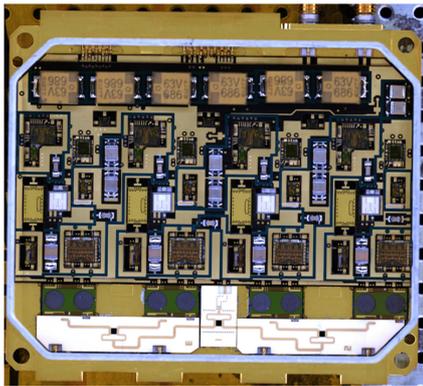


图8 50 W T/R 组件实物图

Fig. 8 The photo of the 50 W T/R module

经测试,50 W T/R 组件单通道发射功率大于 50 W,接收增益大于 25 dB,噪声系数小于 3.5 dB,测试结果满足设计指标要求。

4 结论

本文介绍了一款星载 4 通道 X 波段 50 W T/R 组件的高密度组装技术,重点介绍了关键工序控制与实现途径,实现了 4 通道大功率芯片、基板、与其它元器件的低空洞率一体化焊接,不仅满足产品的性能要求,也保证了高密度组装过程的可操作性和产品的高可靠性。组装后的产品测试结果表明,该 50 W T/R 组件的性能满足总体技术指标要求。本文所述的组装工艺技术对同类高密度混合封装产品的设计和工艺实现具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] SALAZAR J L, MEDINA R H, LOEW E. T/R modules for active phased array radars [C]//2015 IEEE Radar Conference (RadarCon), 2015:1125-1133.
- [2] 锥寒冰,杨晶晶,张红英,等.一种 C 波段小型 TR 组件的设计[J].数字技术与应用,2018(8):154-155.
- [3] 郝金中,张瑜,周扬.一种宽带多通道瓦片式 T/R 组件的研制[J].电讯技术,2015,55(1):108-112.
- [4] 鲁加国.星载合成孔径雷达中的微波技术(摘要)[C]//2015 年全国微波毫米波会议论文集.合肥,2015:28-29.
- [5] 于洪喜.通信卫星有效载荷技术的发展[J].空间电子技术,2015,12(3):1-3.
- [6] 任军强,邹恒光,周钠,等.相控阵天线与固定多波束天线在通信卫星系统中的应用分析[J].国际太空,2015(11):55-60.
- [7] HANGAI M, TORII T, YAMAGUCHI Y, et al. Microwave and millimeter-wave GaN amplifiers for satellite communications [C]//2018 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), 2018:70-72.
- [8] 邱钢,敬小东,王海龙.宽禁带固态功放导航卫星中的应用[J].导航定位学报,2015,3(2):94-97.
- [9] 赵青.一种新型 Ku 频段瓦式 T/R 组件的研制[J].电讯技术,2018,58(6):727-731.
- [10] 李小春. C 波段高集成高功率 GaN T/R 模块研究[J].舰船电子对抗,2016,39(4):110-112.
- [11] GRYGLEWSKI D, ROSOLOWSKI D, WOJTASIAK W, et al. A 10 W GaN based X-band T/R module for AESA [C]//2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON), 2016:1-4.
- [12] 吴金财,严伟,韩宗杰.微波毫米波多芯片模块三维互联与封装技术[J].微波学报,2018,34(2):61-64.
- [13] 肖宁,秦立峰,张选,等. X 波段氮化镓小型化 T/R 组件的设计与实现[J].无线电工程,2017,47(11):63-66.
- [14] 谭超,孙小燕,银恺,等.飞秒激光切割金属的表面粗糙度[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(12):4481-4487.
- [15] 贾忠中. SMT 核心工艺解析与案例分析[M].北京:电子工业出版社,2016:90-93.