DOI:10.3969/j.issn.1674-7135.2023.03.013

星载大功率固放组件中常用基板材料的 出气及其微波特性研究

王杨婧^{1,2,3},谢拥军^{1,3,4},夏维娟²,苏 璞²,武沛羽^{1,3,4}

(1.北京航空航天大学电子信息工程学院,北京 100191;2.中国空间技术研究院西安分院,西安 710000;3.微波感知与安防应用北京市重点实验室,北京 100191;4.深圳北航新兴产业技术研究院,深圳 518057)

摘 要:随着星载大功率固放组件复杂度和输出功率的不断提高,因其内部材料出气而导致产品 性能异常的情况时有发生。以大功率固放组件常用介质基板材料出气产生的水汽、氢气和氧气作 为研究对象,研究了高功率微波信号作用下基板材料出气气体对大功率固放组件微波特性的影 响;对出气的气体成分进行了定量测试试验验证,随后通过真空烘烤对基板进行除气处理;首次结 合产品应用和环境试验进行了补充试验,通过增加长期和高温储存试验来模拟实际工况;试验结果表 明除气措施可有效降低基板材料出气气体的含量,降幅超过79.1%;最后选取一组试验后的测试试验 数据对基板除气的有效性进行了仿真验证,为星载大功率固放组件的进一步优化奠定了基础。 关键词:星载;固放;大功率;材料出气

中图分类号:TN704; V443 文献标志码: B 文章编号: 1674-7135(2023) 03-0078-06

Research of the outgassing and the influence on spaceborne high-power solid state power amplifier

WANG Yangjing^{1,2,3}, XIE Yongjun^{1,3,4}, XIA Weijuan², SU Pu², WU Peiyu^{1,3,4}

(1. Beihang University, Beijing 100191, China; 2. China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710000, China;

3. Beijing Key Laboratory of Microwave Sensing and Security Application, Beijing 100191, China;

4. Research Institute of Beihang University in Shenzhen, Shenzhen 518057, China)

Abstract: With the continuous improvement of output power and the increasing complexity of the spaceborne high-power solid state power amplifier, the abnormal performance of products is often caused by the outgassing. In this paper, the water vapor, hydrogen and oxygen outgassinged from the dielectric substrate materials are taken as the research object. And the influences of the outgassing on the microwave characteristics are analysed. The gas composition was quantitatively tested and verified, and then the substrate was degassed by vacuum baking to reduce the content of the gas. For the first time, a supplementary test was carried out by combining product application and environmental test, and a long-term and high temperature storage test was added to simulate the actual condition. And the reduction of outgassing is at least 79.1%. Finally, the degassing effect is verified by simulation based on the test results.

Key words: spaceborne; solid state power amplifier; high-power; outgassing

收稿日期:2023-02-01; 修回日期:2023-02-16

基金项目:空间微波技术重点实验室基金(编号:6142411032201);国家重点研发计划(编号:2020YFB1807400);国家自然科学 基金(编号:61571022, 61971022, 61801376);重点实验室基金(编号:HTKJ2019KL504013, 61424020305)

引用格式:王杨婧,谢拥军,夏维娟,等. 星载大功率固放组件中常用基板材料的出气及其微波特性研究[J]. 空间电子技术, 2023,20(3):78-83. WANG Y J, XIE Y J, XIA W J, et al. Research of the outgassing and the influence on spaceborne high-power solid state power amplifier[J]. Space Electronic Technology, 2023,20(3):78-83.

0 引言

大功率固态功率放大器(简称:固放)是卫星转 发器系统中发射前端不可或缺的组件^[1-2],其直接 决定着整个卫星转发器系统的整体性能,由于卫星 载荷应用的特殊性,不仅要求大功率固放组件可以 提供高功率的输出,同时又对其小型化和高集成度 提出了更严苛的要求。近年来,随着大功率芯片技 术的迅猛发展,大功率固放组件的复杂度和功率容 量也随之越来越高,大功率固放组件中的材料类型 也逐步增多,包括芯片、焊接材料、胶接材料、基板 材料、键合丝材料、管壳材料等。多种材料被共同 封装在一个结构腔体内,大功率固放组件的封装也 由单个芯片的小模块封装发展为多芯片、多器件和 多功能基板的复杂组件封装^[3]。

大功率固放组件在工作时通常会产生大量热, 在高温的作用下,管壳内部材料、特别是多层介质 基板内部的气体将加速析出^[4],在材料表面或腔体 内形成混合气体气团,气团在高功率微波信号的作 用下极易发生电离,产生高能等离子体,而等离子 体往往具有一定的微波特性^[5],这将严重影响整个 大功率固放的性能。

本文以星载大功率固放组件中常用基板材料 出气产生的气体作为研究对象,研究高功率微波信 号作用下,基板材料出气气体对大功率固放组件微 波特性的影响;通过试验对出气的气体成分进行了 定量测试,对基板材料进行除气处理,最后结合试 验结果,对除气后的微波特性进行了仿真验证。

1 出气气体对固放组件微波特性的 影响

星载大功率固放组件一般由金属壳体、半导体芯片、基板以及各类工艺辅料组成^[3]。其中金属管壳和半导体芯片由无机材料构成,因出气率较低不进行专门研究。基板则以聚四氟乙烯填料或非聚四氟乙烯填料的多层混压高频介质基板为主,为有机材料,且面积较大,是封装内部出气成分的主要来源^[6]。对于星载大功率固放组件来说,较为关注的几种气体成分为:水汽、氢气、氧气、二氧化碳,若这些气体组份含量超标,往往会对组件内部的芯片产生不良影响,如腐蚀、氢中毒、氧化等^[7],影响组件的长期可靠性;其中,水汽、氢气、氧气在特定条件下可能发生电离并产生等离子体^[8],改变初始

的场分布,进而对大功率固放组件的性能造成不良影响。

以某型号 L 频段 850 W 固放(简称:L-850 W 固 放)^[9]为原型,对其末级匹配放大电路进行简化建 模,如图 1 所示,其中基板尺寸为 15 mm × 15 mm × 1 mm、材料为 Rogers RO4003。





(b) 简化模型

power amplifier and its simplified model

当星载大功率固放在轨工作时,理论上其工作 环境为真空,因此假设 L-850W 末级匹配放大电路 模型中基板上方空腔部分为真空,空腔部分的体积 为15 mm×15 mm×10 mm,此时该空腔部分的电场 强度分布如图 2 所示,插损(S21)如图 2(c)所示。 选取基板上方空腔中任意一点 *P*₁ 作为参照标准,当 空腔部分为真空时,该点的电场强度幅度值约为 80912.4 V/m。





图 2 真空条件下的电场强度分布及 S21 参数 Fig. 2 Electric field intensity distribution and S21 parameter of vacuum

然而实际的工况条件下,大功率固放组件中 基板材料的出气,会导致基板上方的空腔被少量 气体混合物填充。因此,假设 L-850 W 固放末级匹 配放大电路基板材料出气产生的气体,均匀填充 于基板上方空腔中。根据以往的工程经验,基板 未经除气处理时,1000 mm³内的水汽、氢气和氧气 含量均会大于3000 ppm,且由于后加工和基板自 身的吸附特性影响,水汽和氢气含量将占据主导, 因此假设水汽、氢气、氧气的混合气体组成为:水 汽 800 000 ppm、氢气 20 000 ppm、氧气 3 000 ppm, 在高功率微波信号作用下3种气体混合物被电离 而形成的等离子体参数为^[10]: $\varepsilon_r = 4, \mu_r = 1, \sigma =$ 0 S/m,δ=0.28×10¹⁶s⁻¹。此时基板上方空腔被等 离子体气团填充,其电场强度如图3所示,任意一 点 P1 处的电场强度幅度值约为116149.3 V/m,与 真空条件下的电场强度相比,不仅矢量方向改变, 且幅度增加了43.5%。

与真空条件下的电场强度分布及 S21 参数进行 比对可以看出,混合气体形成的等离子体气团严重 影响了空间场分布,特别是在接头部位形成了较为 集中的场强分布,对 L-850 W 固放末级匹配放大电 路的正向传输系数 S21 产生了显著影响。



2 常用基板材料的出气气体成分分析 与控制

2.1 常用基板材料的出气气分

密封器件内部气体分析方法是一种广泛应用 于半导体封装领域的检测手段,可以对密封器件内 部各种常见气体进行气体成分分析(气分)和含量 分析^[11]。本次试验以应用频次最高的 RT6002、 RO4003C、TSM-DS3 基板作为研究对象进行试验。 如图4 所示,加工内腔尺寸为 13.6 mm × 10 mm × 4 mm 的双腔结构金属壳体,将以上4 种基板(均为 4 层混压) 裁成 12 mm × 8 mm × 1 mm 的小块, 按标准 组装流程烘烤后密封到双腔金属壳体中, 随后进行 气体成分检测。



图 4 双腔体结构金属壳体 Fig. 4 Metal housing of double cavity

按照 GJB 548B—2005《微电子器件试验方法和 程序》试验方法 1018.1^[12]进行分析后,得到水汽、 氢气、氧气的含量如表 1 所列。

表1 水汽/氢气/氧气含量/ppm Tab.1 Content of water vapor/hvdrogen/oxygen

_			· ···F ···· ··· ··· ··· ··· ··· ··· ···		
		RT6002	RO4003C	TSM-DS3	
	水汽	8 000	4 300	1 700	
	氢气	2000	1 500	1 220	
	氧气	< 100	140	< 100	

若测试管壳腔体体积为V,测试基板体积为 V_1 , 气体含量为X ppm。实际组件中腔体体积为V',实 际组件中基板体积为 V_1 的n倍,实际组件中腔体气 体成分Y为^[12]:

$$Y = \frac{n * X(V' - nV_1)}{V - V_1}$$
(1)

以 L-850 W 固放末级匹配放大电路仿真模型中 基板上方的空腔体积进行换算,可得水汽、氢气、氧 气的含量分别为:45580 ppm、15900 ppm、1484 ppm, 与上一节根据实际工程经验的假设值较为接近。 因此可以推断,若基板材料直接应用于大功率固放 组件中,极有可能因材料出气而影响组件的性能。

2.2 常用基板材料的出气控制

为了进一步减少基板的材料出气,对基板采取 了真空烘烤除气处理措施,再次制作样件进行检 测,得到水汽、氢气、氧气的含量如表2所列。

从测试结果可以看出,真空烘烤可以有效地实 现基板除气,能大幅降低水汽、氢气、氧气的含量。 然而,星载功率放大器组件组装完成后还会经历一 系列可靠性试验,其中长时间储存和高温可能使基 板进一步释放气体,因此在前一轮12h烘烤除气的 基础上分别增加储存、高温试验后再进行气体分 析。表3为经历12h真空烘烤除气、存储30d和 60d后,常温或再经历85℃2000h高温试验后的水 汽、氢气、氧气含量。

after degassing						
Tab. 2	Content of water vapor/hydrogen/oxygen					
表 2 基	基板除气处理后的水汽/氢气/氧气含量/ppm					

		RT6002			
烘烤时间	未烘	48 h	24 h	12 h	
水汽	8 000	420	620	400	
氢气	2000	< 100	< 100	150	
氧气	< 100	ND	ND	ND	
	F	RO4003C			
烘烤时间	未烘	48 h	$24\mathrm{h}$	$12\mathrm{h}$	
水汽	4 300	530	1 000	1 000	
氢气	1 500	140	170	200	
氧气	140	ND	ND	ND	
TSM-DS3					
烘烤时间	未烘	48 h	$24\mathrm{h}$	$12\mathrm{h}$	
水汽	1 700	220	320	190	
氢气	1 2 2 0	< 100	< 100	< 100	
氧气	< 100	ND	ND	ND	

表 3 储存和高温试验后的水汽/氢气/氧气含量/ppm

Tab. 3 Content of water vapor/hydrogen/oxygen after storage and high temperature

-	9-	 8	•••••P	

RT6002						
体友	千	30	30 d		60 d	
伸行	٦.	常温	高温	常温	高温	
水汽	400	660	710	400	459	
氢气	150	330	207	231	224	
氧气	ND	ND	<100	ND	< 100	
		R040	03C			
体大	王	30	30 d		60 d	
1泊1子		常温	高温	常温	高温	
水汽	1 000	1 307	1455	1 380	1 4 3 0	
氢气	200	389	333	358	314	
氧气	ND	ND	< 100	ND	<100	
TSM-DS3						
体友	干	30	30 d		60 d	
馅仔		常温	高温	常温	高温	
水汽	190	200	312	197	225	
氢气	<100	600	528	200	193	
氧气	ND	ND	< 100	ND	< 100	

从测试结果可以看出,长时间储存或高温试验 后的气体含量均有所增长,但与未采取真空除气措 施的基板出气气体成分相比,水汽、氢气、氧气的含 量均有明显下降。RT6002基板出气产生的水汽、氢 气、氧气含量的最大降幅为95%、89.7%、100%; RO4003C基板出气产生的水汽、氢气、氧气含量的 最大降幅为92.9%、79.1%、100%;TSM-DS3基板 出气产生的水汽、氢气、氧气含量的最大降幅为 88.4%、84.2%、100%。

3 除气处理基板对固放组件微波特性 的影响

以 RO4003C 基板经历 12h 真空烘烤除气、30d 储存和高温试验结果后的气体含量测试结果为依据, 通过式(1)计算可得 L-850W 固放末级匹配放大电路 简化模型中基板上方空腔内的水汽、氢气、氧气含量 分别为:4823 ppm、3529 ppm、1060 ppm。此时,高功 率微波信号作用下该混合气体的等离子体参数为: $\varepsilon_r = 1.8$, $\mu_r = 1$, $\sigma = 0$ S/m, $\delta = 1.34 \times 10^{16}$ s⁻¹,仿真可 得基板上方的电场强度如图 5 所示,任意一点 P_1 处 的电场强度幅度值约为76049.3 V/m,与真空条件下的 电场强度相比,矢量方向一致,幅度仅降低了 6.0%。





出气产生的水汽、氢气、氧气混合气体,在大功率微 波信号作用下形成的等离子体气团仍然会小范围 影响空间场分布,任意 P₁ 点处的电场强度在真空、 未除气和除气并试验后分别为:80912.4 V/m、 116149.3 V/m和76049.3 V/m。可以发现,P₁ 点处 的电场强度未除气时增大、除气并试验后减小,这 是由于腔体内电场强度的变化是非均匀的,从图 2 (b)、图3(b)和图5(b)可以看出,接头部位电场分 布呈变强趋势、而微带线部位的电场分布呈减弱 趋势。

总的来说,由于基板经过了除气处理后出气的 气体含量较低,对大功率固放组件微波性能的影响 已大大降低,尤其是对微波传输特性(S21参数)的 影响几乎可以忽略。

4 结论

本文以大功率固放组件常用介质基板材料出 气产生的水汽、氢气和氧气作为研究对象,出气气 体在高功率微波信号作用下,对大功率固放组件微 波特性的影响进行了仿真研究;通过密封器件内部 气体分析试验,对出气的气体成分进行了定量测 试,随后通过采取真空烘烤对基板进行除气处理, 有效降低了基板材料出气气体的含量;最后结合测 试结果对基板除气的效果开展了仿真验证,证明了 出气气体含量降低后对微波性能的影响极小。

参考文献:

- [1] 李文明.固态功率放大器的优越性及其在卫星通信地 球站中的成功应用[J].电子器件,2000,23(1):25-30.
- [2] LOHMEYER W Q, ANICETO R J, CAHOY K L. Communication satellite power amplifiers: Current and future SS-PA and TWTA technologies [J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2016, 34(2): 95-113.
- [3] 杨飞,赵恒飞,刘江涛,等. 星载固态功率放大器:迈向极高频[J]. 红外与毫米波学报,2021,40(1):25-32.
- [4] MERRYMAN S A, LITTLE J C, PHILLIPS R G, et al. Characterizing space vacuum contamination due to outgassing from dielectrics [C]//Proceedings of IEEE Energy and Information Technologies in the Southeast, 1989: 1381-1384.
- [5] 金兹堡.电磁波在等离子体中的传播[M]. 钱善瑎,译.北京:科学出版社,1978.
- [6] DEMAXSS P. Outgassing of high temperature-resistant organic polymeric materials [J]. Polymer Engineering and Science, 1981, 21(7):385-389.

- [7] REISINGER A R, ADAMS S B, IMMORLICA A A. Outgassing of hydrogen in an enclosed cavity and ramifications on the reliability of GaAs devices [C]//1997 GaAs Reliability Workshop, 1997:77-95.
- [8] 郑体凯,李修乾,车学科,等.氢气/氧气混合气体等离子体放电动力学机理[J].高压电器,2020,56(1):
 114-120.
- [9] 安笑笑,陈俊,苏璞,等. 星载大功率固放局部低气压 放电的防控技术[J]. 空间电子技术,2022,19(1): 102-105.
- [10] WANG Y J, XIE Y J, SU P, et al. One-step crank-nicolson direct-splitting algorithm with enhanced absorption to evaluate low-pressure discharge for satellite sensors in outer space[J]. Sensors, 2023, 23(3):1085.
- [11] 陈冬梅.密封器件内部气体分析方法综述[J].电子产 品可靠性与环境试验,2001,19(1):34-39.
- [12] 中国人民解放军总装备部电子信息基础部. 微电子器 件试验方法和程序: GJB 548B—2005[S]. 中国人民解 放军总装备部,2005: 66-69.

作者简介:王杨婧(1987—),陕西西安人,高级工程师。主要研究方向为混合封装和电磁计算。E-mail:piratewyj@163.com 通讯作者:武沛羽(1994—),辽宁大连人,博士后。主要研究方向:计算电磁学及应用、天线与微波工程、电子对抗、空间微波特 殊效应、多物理场高效算法。E-mail:wupuuu@hotmail.com