

在役晶体管湿热试验失效模式及机理研究

姚珂, 郑南飞, 罗琴, 邱森宝, 邹祁峰, 李坤兰

(工业和信息化部电子第五研究所, 广州 510610)

摘要: **目的** 研究在役晶体管湿热试验的失效模式及失效机理, 为减少晶体管失效提出改进建议。**方法** 选取长期贮存了10余年未失效的3型在役晶体管进行湿热环境试验, 采用扫描电镜观测、电性能参数测试、离子色谱分析等方法研究晶体管失效的模式和失效机理。**结果** 晶体管经过2 160 h湿热试验后, 有3.75%的晶体管发生失效, 其中晶体管管腿断裂失效比例占2.50%, 失效机理为应力腐蚀开裂; 晶体管参数超标比例为1.25%, 失效机理为器件背部或三防漆所含粘附离子引起的漏电。**结论** 湿热试验会加速在役晶体管的失效, 其失效模式主要为因应力腐蚀开裂导致的管腿断裂以及因表面粘附离子引起的参数超差。建议在晶体管的寿命期内加强质量管理, 改善不当的制管工艺, 减少器件的内部缺陷及残余应力的存在, 控制器件贮存环境的温湿度以及大气成分, 杜绝氯离子等粘附离子及其他活性物质的引入。

关键词: 晶体管; 湿热试验; 失效模式; 失效机理

中图分类号: TJ089

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2023)02-0110-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.02.015

Failure Mode and Mechanism of In-service Transistors in Damp Heat Test

YAO Ke, ZHENG Nan-fei, LUO Qin, QIU Sen-bao, ZOU Qi-feng, LI Kun-lan

(The Fifth Electronics Research Institute of Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 510610, China)

ABSTRACT: The work aims to study the failure mode and failure mechanism of in-service transistors in damp heat test, and to propose improvement suggestions for reducing transistor failures. Three types of in-service transistors stored for more than 10 years without failure were selected for the damp heat test. The failure mode and failure mechanism of the transistors were studied by scanning electron microscope observation, electrical performance parameter testing, and ion chromatography analysis, etc. The results showed that 3.75% of transistors failed after 2 160 hours of damp heat test, including 2.50% of transistor lead breakage failure, and the failure mechanism was stress corrosion cracking; 1.25% of transistor parameters exceeded the standard. The failure mechanism was electric leakage caused by the adhesion ions contained in the back of the device or conformal coating. Damp heat test accelerates the failure of in-service transistors. The main failure modes are lead breakage due to stress corrosion cracking and parameter out-of-tolerance due to surface adhering ions. It is recommended to strengthen quality control during the lifetime of transistors, improve improper tube manufacturing process, reduce internal defects and residual stress, control the temperature, humidity and atmospheric composition of the storage environment, eliminate chloride ions and other adhering ions, and avoid the introduction of other reactive substances.

收稿日期: 2021-08-31; 修订日期: 2022-01-13

Received: 2021-08-31; Revised: 2022-01-13

作者简介: 姚珂(1983—), 女, 硕士。

Biography: YAO Ke (1983-) Female, Master.

引文格式: 姚珂, 郑南飞, 罗琴, 等. 在役晶体管湿热试验失效模式及机理研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(2): 110-117.

YAO Ke, ZHENG Nan-fei, LUO Qin, et al. Failure Mode and Mechanism of In-service Transistors in Damp Heat Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(2): 110-117.

KEY WORDS: transistor; damp heat test; failure mode; failure mechanism

武器系统在贮存使用过程中要经受所处环境因素的影响, 各种环境因素通过对武器系统的激励, 会激活内部潜在的失效因素, 导致其性能发生变化, 甚至无法完成其规定功能。特别是作为武器系统正常工作基础的电子元器件, 在系统中用量巨大, 其贮存失效会严重影响其服役寿命。

电子元器件中的晶体管对信号有放大作用和开关特性, 用它构成的各种功能的电子电路广泛应用于武器系统中, 是不可缺少的电子器件。晶体管在贮存和使用的状态下也会受到各种环境因素的影响, 是影响其性能的一个基本要素。关于环境条件对元器件的影响, 研究学者开展了大量的研究工作^[1-8]。例如, 藏学旺等^[1]经过研究发现, 晶体管 3DG405A 和 3DG6D 经过 55 ℃ 交变湿热及湿热、低温和振动组合试验后, 参数失效都在 70% 以上。刘慧丛等^[2]针对电子设备中器件在贮存环境下由于温度、湿度的变化引起的腐蚀问题, 对器件镀覆 Ni/Pd/Au 镀层的电子器件进行了湿热试验, 考察了贮存环境中的温度、湿度以及器件表面状态包括黏附盐分、表面划伤、黏附灰尘等因素对镀层腐蚀的影响。尽管许多学者都开展了元器件的环境试验, 并研究了环境因素对器件的影响, 但此类研究对象均是未在役的新电子元器件, 对在役电子元器件环境因素影响的研究较少, 关于湿热试验对其影响的研究也很少。

在役晶体管随装备存放在库房中, 根据任务需要进行转场使用, 在贮存和转场使用中会遭遇湿热环境。湿热是器件失效的重要因素, 包含温度和湿度的协同作用。文献[1,3]表明, 温度是增进腐蚀反应的动力之一, 相对湿度是自然环境中最大的腐蚀因素之一。40 ℃ 以上对腐蚀反应速度影响较大, 腐蚀速度很快。在与其他腐蚀因素协同作用时, 通常相对湿度在 60% 左右腐蚀速率会增大, 而超过 75% 时, 腐蚀速率会急剧增大。因湿热地区自然环境中出现最高相对湿度 95%, 并伴随气温 30 ℃ 的情况是较少的, 所以根据相关文献及工程经验, 本研究选择了 40 ℃、80% 和 40 ℃、90% 这 2 个条件开展湿热试验。

在役电子元器件已经经历了一段时间环境因素

的影响, 为了能快速地暴露出在役晶体管的潜在故障, 本研究选取了从贮存了 10 余年的某武器系统取下的未失效在役晶体管进行湿热试验, 开展失效分析, 研究失效机理, 提出改进和预防措施。

1 试验

1.1 样品

选取长期贮存了 10 余年未失效的 3 型在役晶体管共 120 只进行湿热试验。环境试验前, 先完成晶体管的性能测试, 以确保参试晶体管工作正常。性能测试完成后, 其中 80 只晶体管均分为 2 组进行湿热试验, 剩余 40 只进行对比试验。

1.2 方法

对 3 个型号的晶体管进行湿热试验, 研究了湿热试验对晶体管的影响。湿热试验条件分别为 40 ℃、80%RH 和 40 ℃、90%RH。每隔 30 d (720 h) 取出样品, 完成性能测试后, 再入箱继续进行湿热试验, 总共试验时间为 2 160 h。

晶体管性能测试参数主要为集电极反向截止电流 I_{CBO} 和直流放大倍数 h_{FE} , 测试条件及合格判据都根据产品的型号要求确定。晶体管性能测试完成后, 对失效的晶体管进行了失效分析, 研究了失效机理。

试验过程中, 拆卸过程按照元器件拆卸要求进行, 为防止其他物质的引入, 试验人员全程操作均佩戴手套。

2 结果及分析

2.1 晶体管湿热试验失效模式统计

累积湿热试验 2 160 h 后, 3 型晶体管共计 3 只发生了失效, 其中 2 只管腿断裂, 1 只参数超差, 失效情况统计见表 1。由表 1 可见, 经过 2 160 h 湿热试验后, 失效晶体管所占比例为 3.75%, 在失效晶体管中管腿断裂占 2.5%, 参数超差占 1.25%。管腿断裂

表 1 环境试验晶体管的失效统计
Tab.1 Transistors failure statistics under environment tests

序号	名称	数量/只	失效数/只	失效样品编号	环境试验条件	失效时间/h	失效模式
1	某 I 型 PNP 硅高频小功率晶体管	40	1	453#	40 ℃、90%RH	720	管腿断裂
2	某 II 型 NPN 硅外延平面高频小功率三极管	30	1	276#	40 ℃、90%RH	1 440	参数超差
3	某 V 型 NPN 硅外延平面高频小功率三极管	10	1	176#	40 ℃、80%RH	720	管腿断裂

的失效时间均发生在 720 h 后, 参数超差的失效时间是 1 440 h 后。

一般情况下, 半导体器件的失效模式大致可分为 6 类, 即开路、短路、无功能、特性劣化、重测合格率低和结构不好^[9]。对于不同器件, 贮存失效表现形式很多, 主要表现为参数漂移、开路、短路、漏气(水汽含量超标)、外引线断裂等。贮存失效机理主要集中表现为腐蚀失效、键合/贴装失效、密封失效、工艺缺陷等^[10]。在本研究中, 失效模式统计结果表明, 从长期贮存的某武器系统上拆卸下来的在役晶体管, 在进行湿热试验后, 失效模式是参数超差和管腿断裂。

2.2 晶体管湿热试验失效机理分析

针对失效的晶体管, 本研究利用物理及化学的分析手段对其进行了分析研究, 确定了失效原因, 明确了失效机理。

2.2.1 管腿断裂机理分析

晶体管管腿断裂会导致较严重的后果, 很多研究学者都对此进行了研究^[11-20]。本研究对 2 只经过湿热试验后管腿断裂的晶体管开展了失效机理研究。

以编号为 453#某 I 型 PNP 硅高频小功率晶体管为例进行分析。该晶体管经过 720 h 的 40 ℃、90%RH 湿热试验后, 管腿断裂。在体视显微镜下对晶体管进行宏观检查发现, 管腿断裂的位置出现在根部, 即管腿的应力集中处, 如图 1 所示。

管腿断面 SEM 形貌显示, 断面呈现 2 种不同的形貌, 断面的下方断面平整, 呈准解理形貌(如图 2 区域 A、C 所示); 在断面上方观察到大量的韧窝, 为韧性断裂(如图 2 区域 B 所示), 该形貌为应力腐蚀断裂形貌特征。EDS 结果表明, 在管腿上还检出有一定的腐蚀性元素氯(Cl), 说明三极管断面存在一定的腐蚀(如图 3 所示)。

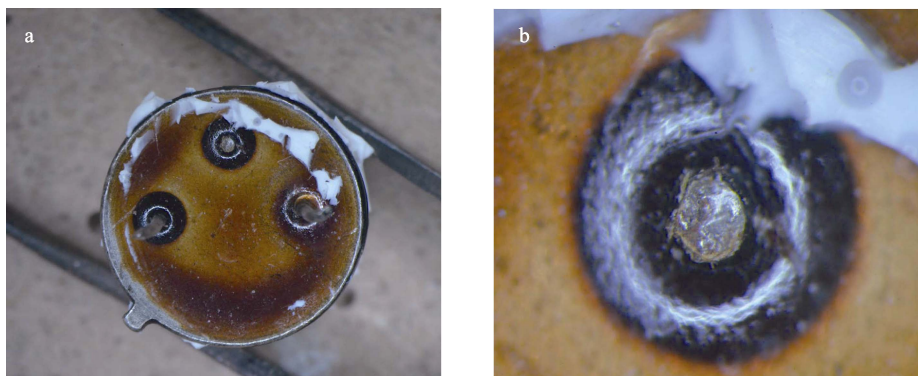


图 1 晶体管 453#管腿及断裂部位外观照片

Fig.1 Appearance images of lead and breakage position for transistor 453#

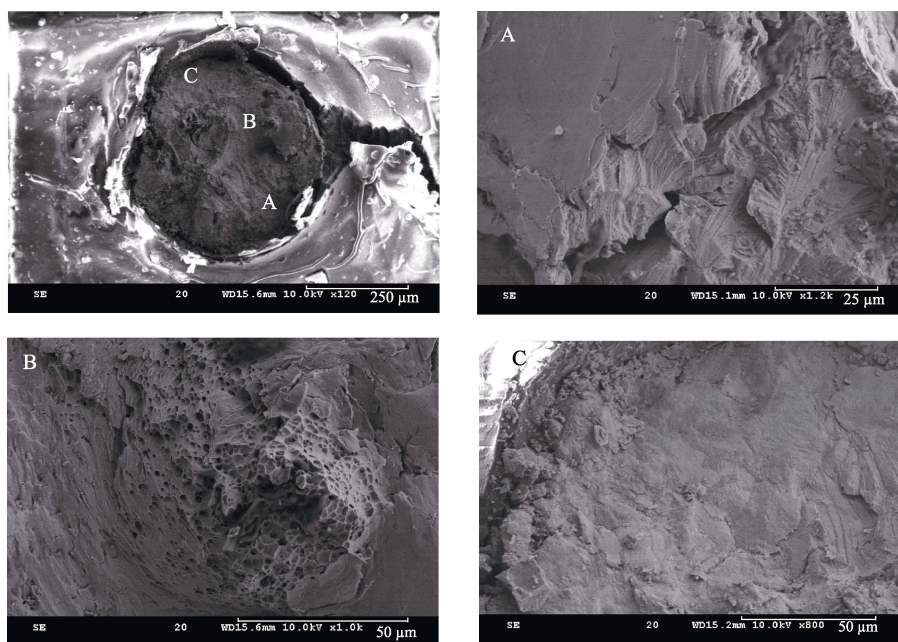


图 2 晶体管 453#管腿断裂截面 SEM 观察照片

Fig.2 SEM images of lead breakage section for transistor 453#

经过综合分析可知, 晶体管的管腿材料为可阀合金, 很容易吸附氯离子。氯离子可以局部破坏钝化膜, 使该处金属容易溶解而成为小阳极, 周围大面积金属成为大阴极, 促进可阀合金的电化学腐蚀向基体纵深发展。湿热试验对器件腐蚀失效的影响主要表现在湿度会在器件金属表面形成一层液膜, 在腐蚀介质的共同作用下促进电化学腐蚀, 从而导致器件的失效。

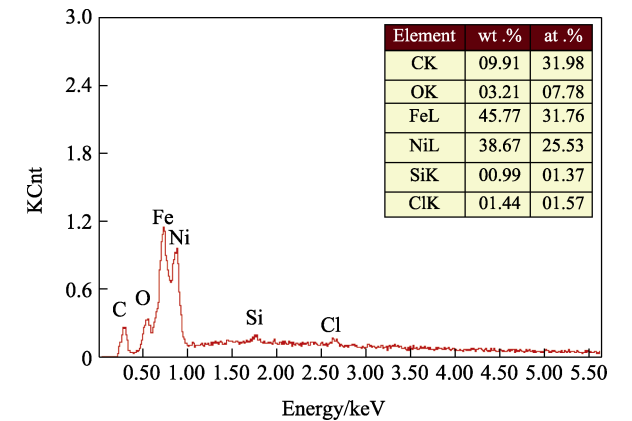


图 3 晶体管 453#管腿表面 EDS 检测结果
Fig.3 EDS result of lead surface for transistor 453#

相对湿度是最大的腐蚀因素之一, 通常超过 75% 时, 电子元器件的腐蚀速度会急剧增大, 而且在 40 ℃ 以上的腐蚀反应速度也很快^[3]。另一方面, 晶体管服役多年, 管腿校形、成形后以及受自重作用, 并受到外界振动环境的影响, 内部存在一定的应力。当局部腐蚀区域在机械应力的作用下形成应力集中时, 会使新鲜材料表面露出, 该新鲜材料表面继续发生局部腐蚀而重复前述步骤。在应力以及腐蚀的共同作用下, 晶体管管腿发生断裂。本研究中, 该在役晶体管在武器系统上或已发生了应力腐蚀, 从武器系统上取下后, 在高温高湿环境下, 管腿电化学腐蚀加速导致最

终开裂。另外, 一只某 V 形晶体管 176#经 720 h 的 40 ℃、80%RH 的湿热试验后, 管腿断裂的失效分析过程和结果与 453#晶体管相同, 很多研究也有类似的结论, 此处不再冗述。

2.2.2 参数超差失效机理分析

对参数超差的晶体管按照 GJB 548B—2005《微电子器件试验方法和程序》中的方法 5003“微电路的失效分析程序”开展失效机理研究。编号为 276# 的某 II 型晶体管经过 1 440 h 的 40 ℃、90%RH 湿热试验后, 参数超差。276#晶体管失效分析的结果显示, 晶体管外观、X-ray 结果均未见明显异常, 但内部水汽质量分数超标(水汽质量分数标准为≤0.5%), 为 3.40%。对 276#晶体管进行机械开封、去引线、去胶, 露出内部结构。经观察发现, 样品未见明显异常形貌。为了确定失效样品的失效特性, 利用图示仪对 276#晶体管进行电特性测试, 在未开封前进行第一次电测。由于样品内部芯片通过键合丝与管壳连接, 开封后将键合丝勾断, 将芯片与管壳独立, 分别对芯片和管壳进行第二次测试。去除管壳背面三防漆后, 对管壳引脚进行第三次测试。样品电性能测试结果见表 2, 结果显示, 276#晶体管开封前, 晶体管漏电失效。开封去掉样品内部引线后, 芯片的 C 极-B 极、C 极-E 极漏电流均符合规范, 裸芯片各电特性参数未见异常, 276#晶体管管壳的 C 极引脚-B 极引脚和 C 极引脚-E 极引脚电流均超出规范。去除背面三防漆后, 276#晶体管管壳的 C 极引脚-B 极引脚和 C 极引脚-E 极引脚电流均符合规范。由此可以得出, 晶体管通过背面与三防漆界面或者通过三防漆本身发生了漏电。为了确定其失效机理, 对从 276#晶体管管壳背面剥离的三防漆清洗萃取离子后进行离子色谱分析, 发现三防漆表面含有 Cl⁻、Ca²⁺、Na⁺、K⁺等离子(见表 2、3 和图 4), 在潮湿环境中能够形成导电通道, 从而导致漏电失效。

表 2 276#晶体管的电特性参数测试结果 (t_A=25 ℃)
Tab.2 Electrical characteristic parameter test result of transistor 276# (t_A=25 ℃)

	I _{CBO} /μA	I _{CEO} /μA	I _{EBO} /μA	V _{(BR)CBO} /V	V _{(BR)CEO} /V	V _{(BR)EBO} /V
合格范围 (测试条件)	≤0.5 (V _{CB} =10 V)	≤1 (V _{CE} =10 V)	≤0.5 (V _{EB} =1.5 V)	≥60 (I _C =100 μA)	≥45 (I _C =100 μA)	≥4 (I _E =100 μA)
开封前	0.16	3.79	<1×10 ⁻³	95.0	72.0	6.2
芯片与管壳独立后, 裸芯片测试	6.2×10 ⁻³	3.6×10 ⁻³	\	91.2	72.4	\
去胶前, 独立管壳 引脚测试	3.6	4.5	\	\	\	\
去胶后, 独立管 壳引脚测试	2.4×10 ⁻³	2.3×10 ⁻³	\	\	\	\

表3 276#晶体管的离子色谱分析结果

Tab.3 Ion chromatography analysis result of transistor 276#

峰名称	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺
样品含量/(mg·kg ⁻¹)	9.91	6.26	6.07	2.99	24.56

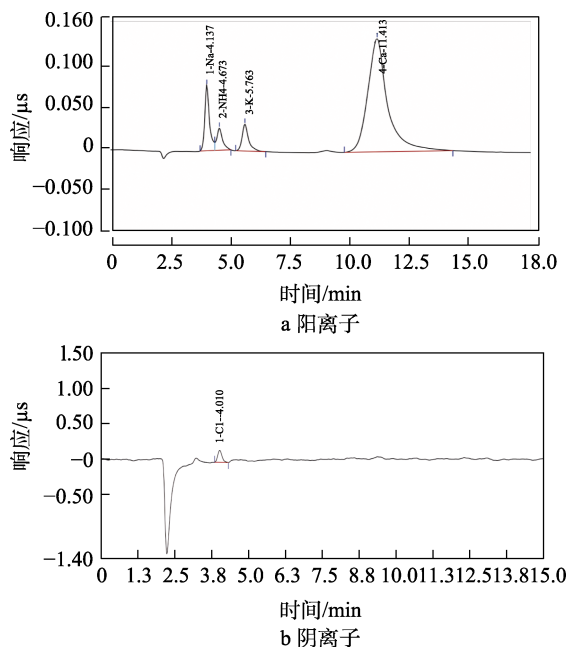


图4 276#晶体管背面三防漆离子色谱分析

Fig.4 Ion chromatography analysis of conformal coating on the back of transistor 276#: a) cation; b) anion

3 改进建议

本研究确定了晶体管经湿热试验后的失效模式和失效机理,为了减少晶体管的失效率,提出了纠正和改进措施。在役晶体管受到贮存等环境条件的影响,且根据任务需要,其环境会发生变化,具有复杂性,本研究的改进建议主要从晶体管本身出发进行分析研究。

3.1 减少管腿断裂的建议

本研究中,晶体管管腿的断裂均因管腿金属发生了应力腐蚀。晶体管的管腿材料为可阀合金(铁钴镍合金),对应力腐蚀开裂较为敏感。发生应力腐蚀的条件有3个:材料为合金材料;存在拉应力(即使很小,也会导致应力腐蚀的发生);在特定的活性介质中。因此,要减少管腿的应力腐蚀断裂,可以从以下3方面进行考虑。

1) 提高引脚材料质量。因可阀合金具有膨胀系数与玻璃相近和塑形好的优点,作为元器件的引脚材料应用十分广泛。虽然可阀合金对应力腐蚀敏感的特点不可避免,但可以尽量减少材料中其他杂质的引入和缺陷的形成。如某些元器件厂家因为工艺的原因,会在引脚材料上掺入锰等杂质,导致引脚变脆,容易断裂,而且材料本身的缺陷也容易引起材料的断裂。

2) 引脚材料的成形及表面处理。管腿在制造和组装过程中,材料多少都会受到局部变形,存在残余应力。残余应力会导致微小拉力的形成,促进应力腐蚀。因此,在后续的工艺中应严格按照工艺文件进行引线的加工处理,减少加工过程中在引线上产生的残余应力,需要时还可对引线的残余应力进行测试,获取相关信息。

3) 减少氯离子等活性物质的引入。已有研究表明,某些元器件因使用的清洗溶剂和助焊剂含有卤素成分,会导致元器件发生腐蚀^[3]。因此,对于氯元素的引入,从源头各个阶段进行分析,用以在后续采取针对性措施,尽量杜绝氯元素和其他腐蚀介质的引入。参试晶体管所使用的装焊流程为预处理(搪锡、成形)、三极管插装、手工焊接、检验、三防处理、点胶粘固。本研究对加工处理过程中可能会引入氯离子的因素进行了化学分析,在松香助焊剂、点粘胶固使用的硅橡胶中均未测出氯离子。在管腿使用的PVC套管中检出氯离子,但是经过清洗静置一段时间后,只检出很微量的氯离子(在误差范围内),说明套管析出氯离子的可能性较小。擦拭用的棉花和三防漆(聚氨酯清漆)中被检出含有氯离子,三防漆表面的含氯量高于漆内部的含量,不排除活性物质在工艺流程上的引入。

除了考虑活性物质工艺流程上的引入,还需要考虑人为因素,是否存在人手接触污染而引入氯离子的情况。有研究表明,单个指印里存有30 μg的氯化钠。国外有研究学者曾对洁净的和手摸过的可阀丝引线做过对比试验,后者出现了应力腐蚀开裂^[20]。因此,为了减少氯离子的引入,一方面要在工艺流程上杜绝活性物质的引入;另一方面,在加工处理时,一定要严格按照工艺文件要求,裸手决不能拿晶体管管腿,应戴上薄纱手套或指套,而且成品在检测和包装运输过程中,也要杜绝人手接触造成的污染。

3.2 减少参数超差的建议

电子元器件失效的主要原因之一是沾污^[21],包括颗粒沾污和表面沾污。本研究中,经环境试验后,性能参数超差的晶体管的失效机理均为由于晶体管背面或三防漆中含有微量Cl⁻、Ca²⁺、Na⁺、K⁺等离子,能够形成导电通道而漏电失效,属于表面沾污。

对于沾污引起的晶体管失效,确定污染源是实施改进措施的先决条件。因为人体汗液除了水以外,还有钠、钾、氯、钙等矿物质,含有晶体管背面或三防漆中检测出的离子,再结合上述化学成分分析的研究结果,存在人为引入了腐蚀离子的可能性。因此,在加工处理、试验和包装运输过程中,一定要提升质量控制,杜绝裸手触碰晶体管,也要杜绝裸手触碰会接触晶体管的物质,以免通过汗液直接和间接引入腐蚀离子。

4 结语

研究表明,晶体管经过2 160 h的湿热试验后,失效晶体管所占比例为3.75%。失效分析结果显示,晶体管失效模式为管腿断裂和性能参数超差。其中,晶体管管腿断裂失效比例占2.5%,参数超标比例为1.25%。晶体管管腿断裂的失效机理均为应力腐蚀开裂,晶体管参数超差的失效机理为器件背部或三防漆所含粘附离子引起的漏电。

针对湿热试验暴露出的晶体管失效问题,为减少管腿发生腐蚀断裂,应提高管腿的质量,改善不当的制管工艺,减少内部缺陷,控制器件贮存环境的温湿度以及大气成分,在管腿加工处理时,应尽量减少残余应力的存在。另外,无论是腐蚀开裂还是粘附离子引起的漏电失效,在晶体管制备、试验、运输、贮存和使用的过程中,均应加强质量管理,杜绝氯离子等粘附离子及其他活性物质的引入。

此外,除了湿度以外,其他的环境包括振动、空气中的灰尘颗粒、硫化物等腐蚀气体、综合环境条件也会引起晶体管的失效,后续再进行研究。

参考文献:

- [1] 藏学旺,陈金驹. 电子元器件、材料及电子电工产品湿热试验方法的研究[J]. 宇航材料工艺, 1984, 14(5): 27-31.
ZANG Xue-wang, CHEN Jin-ju. Study on Wet and Heat Test Method of Electronic Components, Materials and Electronic and Electrical Products[J]. Aerospace Materials & Technology, 1984, 14(5): 27-31.
- [2] 刘慧丛,邢阳,李卫平,等. 湿热贮存环境下电子器件表面镀层的腐蚀研究[J]. 材料工程, 2010, 38(2): 58-63.
LIU Hui-cong, XING Yang, LI Wei-ping, et al. Corrosion on Surface Coating of Electronic Devices in Hygrothermal Environment[J]. Journal of Materials Engineering, 2010, 38(2): 58-63.
- [3] 丁小东. 简谈电子材料的腐蚀[J]. 腐蚀与防护, 2001, 22(3): 129-130.
DING Xiao-dong. Corrosion of the Electron Materials[J]. Corrosion & Protection, 2001, 22(3): 129-130.
- [4] 陈成菊,张小玲,赵利,等. 晶体管的盐雾试验[J]. 半导体技术, 2013, 38(12): 949-954.
CHEN Cheng-ju, ZHANG Xiao-ling, ZHAO Li, et al. Salt Spray Test of Transistor[J]. Semiconductor Technology, 2013, 38(12): 949-954.
- [5] 齐浩淳,张小玲,谢雪松,等. 海洋环境下晶体管加速腐蚀试验中的问题探究[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(7): 110-114.
QI Hao-chun, ZHANG Xiao-ling, XIE Xue-song, et al. Problem Exploration in Accelerating Corrosion Test of Transistors in the Marine Environment[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014, 35(7): 110-114.
- [6] 袁芳,谢雪松,张小玲,等. 海洋环境下晶体管的现场贮存可靠性研究[J]. 半导体技术, 2015, 40(10): 783-788.
YUAN Fang, XIE Xue-song, ZHANG Xiao-ling, et al. Research on the Field Storage Reliability of Transistors in the Marine Environment[J]. Semiconductor Technology, 2015, 40(10): 783-788.
- [7] 肖葵,李晓刚,董超芳,等. 电子元器件环境腐蚀研究进展[J]. 金属世界, 2012(2): 23-25.
XIAO Kui, LI Xiao-gang, DONG Chao-fang, et al. Development on Environmental Corrosion of Electronic Components[J]. Metal World, 2012(2): 23-25.
- [8] 苑国良. 电子元器件发生腐蚀的原因[J]. 电气时代, 2008(2): 104-105.
YUAN Guo-liang. Causes of Corrosion of Electronic Components[J]. Electric Age, 2008(2): 104-105.
- [9] 刘宇通. 电子元器件的失效机理和常见故障分析[J]. 数字通信, 2012, 39(3): 92-96.
LIU Yu-tong. Electronic Primary Device's Failure Mechanism and Common Fault Analysis[J]. Digital Communication, 2012, 39(3): 92-96.
- [10] 祝学军,管飞,王洪波. 战术弹道导弹贮存延寿工程基础[M]. 北京:中国宇航出版社, 2015.
ZHU Xue-jun, GUAN Fei, WANG Hong-bo. Engineering Foundation of Tactical Ballistic Missile Storage and Life Extension[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2015.
- [11] 郭林娣,顾俊祥,胡彩娥,等. 晶体管引线脆断原因的探讨[J]. 上海钢研, 1986(2): 72-76.
GUO Lin-di, GU Jun-xiang, HU Cai-e, et al. Discussion on the Causes of Brittle Fracture of Transistor Leads[J]. Shanghai Steel & Iron Research, 1986(2): 72-76.
- [12] 王开建,王靖,李国良,等. 电子器件引脚失效分析[J]. 现代机械, 2003(5): 46-47.
WANG Kai-jian, WANG Jing, LI Guo-liang, et al. The Failure Analysis of the Electronic Chip Pin[J]. Modern Machinery, 2003(5): 46-47.
- [13] 顾俊祥,王以康,孔焕文. 晶体管镀金可伐(Fe-Ni-Co合金)引线腐蚀断裂原因的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1984, 4(2): 153-158.
GU Jun-xiang, WANG Yi-kang, KONG Huan-wen. an Investigation of the Cause of Corrosion Failure of Gold and Nickel Plated Kovar (Fe-Ni-Co) Lead[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1984, 4(2): 153-158.
- [14] 郭林娣,顾俊祥,胡彩娥,等. 晶体管引线(Fe-Ni-Co合金)断裂的形态分析[J]. 上海金属, 1981, 3(3): 42-47.
GUO Lin-di, GU Jun-xiang, HU Cai-e, et al. Morphological Analysis of Fracture of Transistor Lead (Fe-Ni-Co Alloy)[J]. Shanghai Metals, 1981, 3(3): 42-47.
- [15] 沈卓身,徐金堃,李伟京,等. 镀金晶体管可伐合金外引线腐蚀断裂机构分析[J]. 北京钢铁学院学报, 1987, 9(4): 118-125.
SHEN Zhuo-shen, XU Jin-kun, LI Wei-jing, et al. Analysis of Mechanism of Corrosion Fracture of Gold Plated

- Transistor Leads[J]. Chinese Journal of Engineering, 1987, 9(4): 118-125.
- [16] 周振凯, 赵兰君. 晶体三极管外引线断裂原因分析[J]. 半导体技术, 1990, 15(3): 38-41.
ZHOU Zhen-kai, ZHAO Lan-jun. Reasons for Breakage of External Lead of Triode Transistor [J]. Semiconductor Technology, 1990, 15(3): 38-41.
- [17] 马兆庆, 胡会能, 王全. 三极管内引线键合失效分析[J]. 失效分析与预防, 2007, 2(4): 50-54.
MA Zhao-qing, HU Hui-neng, WANG Quan. Failure Analysis of a Model Audion Inner Lead Bonding[J]. Failure Analysis and Prevention, 2007, 2(4): 50-54.
- [18] 王昆黍, 张超, 张硕. 镀金柯伐合金应力腐蚀断裂的机理、特点和预防措施[J]. 质量与可靠性, 2014(4): 6-8.
WANG Kun-shu, ZHANG Chao, ZHANG Shuo. Mechanism, Characteristics and Preventive Measures of Stress Corrosion Cracking of Gold-Plated Kovar Alloy[J]. Quality and Reliability, 2014(4): 6-8.
- [19] 张霞. 残余应力的产生和对腐蚀开裂的影响研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2008, 26(2): 182-184.
ZHANG Xia. Research on the Formation of Residual Stress and Its Influence on Corrosion Cracking[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2008, 26(2): 182-184.
- [20] 周涛. 晶体管断腿因素的剖析[J]. 继电器, 1989, 17(3): 63-67.
ZHOU Tao. Analysis of Transistor Broken Leg Factors[J]. Relay, 1989, 17(3): 63-67.
- [21] 孔学东, 恩云飞. 电子元器件失效分析与典型案例[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
KONG Xue-dong, EN Yun-fei. Failure Analysis and Typical Cases of Electronic Components[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.

责任编辑: 刘世忠