

# 基于失效物理的微波组件贮存寿命加速试验及预测

马甜, 李传日, 程祺, 荣双龙

(北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 随着通信技术的发展和应用,微波器件的应用越来越广泛,尤其在军事装备领域,微波器件随处可见。大多数军事装备,大部分时间处于贮存、检测等非工作状态,为保证其战备完好性,装备的贮存可靠性评估显得尤为重要。中频对数放大系统是雷达接收机组件中的重要组成部分,通过研究微波组件的中频对数放大器部分的相关文献,得到了微波组件主要失效物理模型,确定其失效判据,并由高温加速寿命试验得到的试验数据,计算出组件激活能,最终完成组件在常温贮存下寿命的预测。

**关键词:** 失效物理; 中频对数放大器; 加速寿命试验; 寿命预测

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2013.04.008

**中图分类号:** TP802<sup>+</sup>.1      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2013)04-0030-04

## Microwave Components Accelerated Life Test and Prediction Based on the Failure Physics

MA Tian, LI Chuan-ri, CHENG Qi, RONG Shuang-long

(Reliability and System Engineering Institute, Beijing of Aeronautics and Astronautics University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** With the development and application of communication technology, the microwave devices are applied more and more widely, especially in military equipment field. For most of the military equipment, they are in storage, testing and other non-working status most of the time; in order to ensure its proper combat readiness, equipment storage reliability evaluation is particularly important. Intermediate frequency logarithmic amplification system is an important component in radar receiver module. Through researching the relevant literature of intermediate frequency logarithmic amplifier, main failure physics model of microwave components was obtained and failure criterion was determined. The component activation energy was calculated from high temperature accelerated life test data. Components' room temperature storage life was predicted.

**Key words:** physics of failure; intermediate frequency logarithmic amplifier; accelerated life test; life prediction

集成电路作为各类电子设备的基本组成元器件,其可靠性直接影响着整个设备的性能及可靠性。可靠性技术对集成电路产业的发展起着非常重

要的作用。随着微电子技术和半导体制造工艺水平的不断向前发展,集成电路的可靠性水平越来越高,寿命也越来越长,这就对集成电路的可靠性评价提

收稿日期: 2013-02-16

作者简介: 马甜(1988—),男,山西大同人,硕士研究生,主要研究方向为产品环境工程。

出了更高的要求。如何在较短时间内对这些复杂集成电路进行评价,合理并及时地提供相关的可靠性信息,就成为亟待解决的问题。

微波单片集成电路(MMIC)是用半导体工艺把有源器件、无源器件和微波传输互连线等全部制作在一片GaAs或硅片上而构成的集成电路微波。GaAs的金属化半导体场效应晶体管(MESFET) MMIC是最成熟应用最多的MMIC,在频率和功率上有着明显优势。新型的高电子迁移率晶体管(HEMT)和异质结双极晶体管(HBT)的出现使HEMT MMIC与HBT MMIC成为国际上研究开发的热点,并逐步替代传统MESFET MMIC,故其失效模式的研究就显得尤为重要和实用。

吴海东等总结了GaAs MMIC的可靠性研究现状,对其进行了分类<sup>[1-2]</sup>;Cramer等研究了GaAs MMIC的失效机理问题,给出了相应的数学模型<sup>[3-4]</sup>。中频对数放大器作为微波组件的重要组成部分和主要失效点,对其进行失效物理研究有着重要意义。通过研究多类文献,给出中频对数放大器单片集成电路在实际贮存环境中的失效模型,由其高温加速试验得到的数据进行寿命预测,取得了良好的效果。

## 1 中频对数放大器失效物理研究

### 1.1 失效物理模型

失效物理模型也可称为应力-破坏模型,通过一个两阶段的过程来实现可靠性和寿命预计。主要内容是研究产品的失效模式及失效机理,建立产品失效寿命与应力载荷之间的关系,即失效模型;在原子和分子的水平上探讨、阐明与电子元件和材料失效有关的内部物理、化学过程(失效机理),最终用于器件的寿命预测计算。优点是无需器件的历史数据,采用失效物理模型对产品进行失效研究有利于实现较高水平的可靠性增长;现有难点是不同的器件有不同的失效模型,同一种器件也可能有多种失效机理,故确定其真实准确的失效模型是研究使用的难点。

贮存寿命是武器装备的重要质量特性,诸如弹箭系统等武器系统在制成后的绝大多数时间里都处在贮存、维护及检修状态。在贮存期间,装备处于非

工作状态,其失效物理模型中的主要应力为温度对器件性能的退化影响,故需建立以温度为应力的中频对数放大器性能退化模型,预测其在不同温度下的寿命。

### 1.2 中频对数放大器失效物理分析

中频对数放大器的薄弱环节是GaAs三极管,GaAs MESFET的栅极肖特基接触退化的主要失效机理是栅金属下沉和栅金属扩散,因而引起有效沟道宽度减小或沟道掺杂浓度的下降(沟道掺杂浓度的下降是由金属杂质引起的深能级补偿作用造成),其表现的两种失效模式是:栅-漏极正向漏电流增大和反向漏电流增大。对其建立失效物理模型方程,见式(1)。

$$\Delta I_{\text{DSS}} = -S_0 \exp\left(-\frac{E}{KT}\right) \sqrt{t} \quad (1)$$

式中: $E$ 为通道激活能; $K$ 为波尔兹曼常数, $\text{J/K}$ ; $T$ 为中频对数放大器退化时对应的热力学温度; $S_0$ 为常数; $I_{\text{DSS}}$ 为漏极电流。

由于 $I_{\text{DSS}}$ 的变化很难测量,故建立栅金属下沉引起的退化导致 $I_{\text{DSS}}$ 为变化与中频对数放大器功率增益 $G$ 的关系,便于试验数据的测量。

放大器基本构造如图1所示,可得到功率增益与输出电压 $U_o$ 、输出电流 $I_o$ 的关系,进而由 $I_o$ 与器件寿命 $t$ 的关系可得到 $G$ 与 $t$ 的关系。

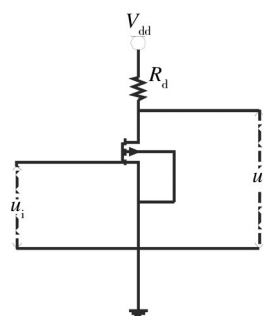


图1 中频对数放大器等效原理

Fig. 1 Intermediate frequency logarithmic amplifier equivalent principle diagram

由分贝定义知:

$$G = 10 \lg P_L / P_{\text{in}} \quad (2)$$

$$G = 10 \lg P_L - 10 \lg P_{\text{in}} \quad (3)$$

式中: $P_L$ 为输出功率; $P_{\text{in}}$ 为输入功率。可得:

$$\frac{P_L}{P_{in}} = 10^{G/10} \tag{4}$$

$$又: P_L = \frac{[(V_{dd}/R_d + R_x) \cdot R_x]^2}{R_L} \tag{5}$$

$$i_D = \frac{[(V_{dd}/R_d + R_x) \cdot R_x]}{R_L} \tag{6}$$

式中:  $V_{dd}$ 为放大器工作电压;  $R_x$ 为漏源电阻;  $R_{is}$ 为负载电阻,  $R_L$ 为并联总电阻;  $i_D$ 为输出电流。则:

$$P_L = [(V_{dd}/R_d + R_x) \cdot R_x] \cdot i_D \tag{7}$$

由式(5)——(7)得:

$$i_D = \frac{10^{G/10} \cdot P_{in}}{[(V_{dd}/R_d + R_x) \cdot R_x]} \tag{8}$$

又知:

$$i_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}} \right) \tag{9}$$

式中;  $u_{GS}$ 为栅源电压;  $U_{GS(off)}$ 为开启电压。则:

$$I_{DSS} = i_D / Z, Z = \left( 1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2 \tag{10}$$

$$\Delta I_{DSS} = \frac{I_{DSS} - I_0}{I_0} \tag{11}$$

综合可得:

$$\frac{I_{DSS}}{I_0} - 1 = - S_0 \exp\left( - \frac{E}{KT} \right) \sqrt{t} \tag{12}$$

$$\frac{I_{DSS}}{I_0} - 1 = \frac{i_{Dt}/Z}{i_{D0}/Z} - 1 = \frac{i_{Dt}}{i_{D0}} = 10^{G_i - G_0/10} - 1 \tag{13}$$

$$10^{G_i - G_0/10} - 1 = - S_0 \exp\left( - \frac{E}{KT} \right) \sqrt{t} \tag{14}$$

式中:  $i_{Dt}$ 为  $t$ 时刻输出电流;  $i_{D0}$ 为初始输出电流;  $G_0$ 为中频对数放大器初始工作标称值;  $G_i$ 为中频对数放大器高温加速试验失效点。由式(14)得:

$$\ln \left[ - (10^{G_i - G_0/10} - 1) \right] = \ln \left[ S_0 \exp\left( - \frac{E}{KT} \right) \right] + \frac{1}{2} \ln t \tag{15}$$

由此得到在不同温度条件下中频对数放大器输出功率增益随时间变化的关系。

## 2 中频对数放大器高温加速试验

### 2.1 加速试验技术

当今科学技术水平迅速发展,设备应用周期缩

短,仅仅依赖长期工作试验得到的经验数据来评价和预测集成电路的可靠性是不科学、不现实的。为了解决这个问题,加速试验被广泛用来激发产品潜在缺陷,缩短试验时间,以期得到更多的可靠性信息。将在高应力水平试验下获得的寿命、性能信息通过合理的统计方法外推,就可以得到常规应力条件下可靠性或寿命的估计。加速寿命试验[5](ALT)是在进行合理工程及统计假设的基础上,利用与物理失效规律相关的统计模型对加速条件下获得的失效数据进行转换,得到试件在正常应力水平下可靠性特征的试验方法。温度作为影响器件失效的重要环境条件,广泛运用在加速试验中。GJB 150A规定的加速试验有高温加速试验、交变高低温试验、温度冲击试验等。加速寿命试验一定程度上减少了试验时间,保证了器件在加速环境和常规条件下失效模型的一致性,有广泛的实用性。

### 2.2 试验设计<sup>[6]</sup>

试验通过单一水平的恒高温加速试验实现对器件退化过程的加速。通过测量试验过程中中频对数放大器的各类输出参数,为基于失效物理模型进行分析提供必要的输入。为避免单个样本可能造成的偶然误差,试验中选取试验样本数为2个。

针对长期贮存环境条件,采用单一水平的恒高温加速试验来实现器件退化过程的加速。考虑样品的极限工作和储存温度范围、各类器件失效机理保持不变的温度条件,参考GJB 150.15,确定恒高温试验的温度值为1001℃。此外,由于在未来10a贮存期内,存在非贮存环境条件如加电测试的影响,在本次试验过程中也给予考虑,进行相应的试验模拟,试验设备如图2所示。



图2 试验设备

Fig. 2 The testing device

试验剖面如图3所示。图3中 $t_1$ 为实验室室温,试验将进行400 h的1001 °C恒高温加速,每间隔50 h将温箱停机;待温度降至实验室室温后,将受试样品取出并在常温下进行加电测试,检测其性能参数;测试完毕将受试样品再放入温箱中升温至1001 °C恒高温。如此循环直至器件失效,试验终止。

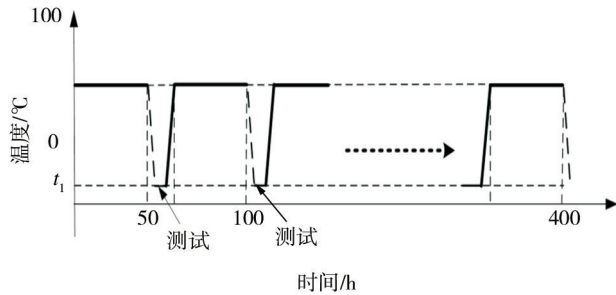


图3 试验剖面  
Fig. 3 Test profile

### 3 试验数据处理

根据加速寿命试验的结果,进行分析和处理,可以得到试验器件的可靠性分布参数。如何采用合理的数学方法对这些数据进行处理,进而准确预测出器件的工作寿命,是一个非常关键的问题。从目前国内外的研究情况来看,元器件寿命预测的数学方法主要有回归预测、灰色理论预测、人工神经网络预测法及时间序列分析预测等方法<sup>[7-11]</sup>,这几种方法都

有各自的特点。拟采用时间序列分析预测法,这种方法突出了时间因素在预测中的作用,将影响预测对象发展变化的因素都归结到时间这一个因素上,只承认所有影响因素的综合作用,具有许多优点。

从试验结果知,两个样本的中频通道功率输出增益随试验时间的增加均出现较大波动,其数值呈下降趋势。因数据波动较大,故对试验所得数据进行除噪计算,去除由偶然噪声引起的误差,得到的数据整理后见表1。由GJB 3492—1998得到其失效判据:器件输出功率低于标称值1 dB。分析数据可知器件在第7次测量时已相对标称值下降1 dB以上,为失效,对试验得到的前7次中的5个数据进行线性拟合,得到高温下的输出功率变化率,数据拟合如图4所示,图中 $Y$ 为表1中随自变量 $\lg(t)$ 变化的因变量。

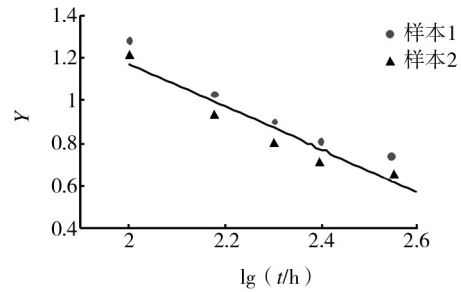


图4 中频对数放大器输出功率增益拟合  
Fig. 4 Fitting chart of intermediate frequency logarithmic amplifier output power gain

表1 高温加速试验数据

Table 1 High temperature accelerated test data

时间/h	$\lg(t)$	样本1		样本2	
		$10^{(G-G_0)/10} - 1$	$-\lg(10^{(G-G_0)/10} - 1)$	$10^{(G-G_0)/10} - 1$	$-\lg(10^{(G-G_0)/10} - 1)$
100	2	0.051 819	1.285 511 666	0.062 662	1.202 996
150	2.176 091	0.092 551	1.033 620 867	0.115 325	0.938 076
200	2.301 03	0.124 93	0.903 332 522	0.155 673	0.807 788
250	2.397 94	0.154 124	0.812 130 681	0.193 98	0.712 243
350	2.544 068	0.179 066	0.746 986 509	0.229 925	0.638 413

结合数据得到中频对数放大器在100 °C下的退化公式:

$$\ln S_0 - \frac{E}{KT_1} = -4.718 \quad (16)$$

由其在常温贮存条件下的退化数据得到其在常

温(20°C)下的退化公式:

$$-4.003 = \ln S_0 - 39.573 E + 4.539 \quad (17)$$

由式(16)和式(17)得到中频对数放大器GaAs极管的激活能为: $E=0.4507$  eV。将 $G_0=-1.18$  dB, (下转第60页)

内部温度可能低于大气温度的情况。

2) 普通干货集装箱没有保温功能,不宜把集装箱当作保温设备长期储存那些对低温比较敏感的物资<sup>[5]</sup>。

3) 为防止温度变化对物资造成应力性的破坏,冬季集装箱内部物资禁止瞬间从温度低的环境转移到温度较高的环境,应该有一个逐渐过渡的过程。

4) 冬季如橡胶、皮革、电工电子产品等对低温比较敏感的物资,应避免长期在集装箱内部储存,以免受到损坏。

5) 对于低温敏感的物资,应采用保温集装箱储运或在包装环节做好保暖等措施,避免物资损坏或

变质,确保储运质量。

参考文献:

[1] 张伦武,许明,王津梅. 军用自然环境试验与民用自然环境试验的关系[J]. 包装工程,2003,24(4):48—49.

[2] 邢申承. 公路水路货物运输环境指南[M]. 北京:中国标准出版社,1995.

[3] 航空工业总公司第301研究所. 环境工程考虑和实验室试验[R]. 北京:航空工业总公司第301研究所,2000.

[4] 卢纹岱. SPSS for Windows 统计分析[M]. 北京:电子工业出版社,2000.

[5] 田润良,李勤真,杨会军. 军用集装箱运输[M]. 北京:解放军出版社,2003.

(上接第33页)

$G_r = -1.83 \text{ dB}$  (失效判据依照 GJB 3492—1998)代入:

$$Y = \ln - (10^{G_r - G_0/10} - 1) \tag{18}$$

式中:Y为表1中随自变量lg(t)变化的因变量。

根据式(17)可得:

$$t = e^{2 \cdot (Y + \ln S_0 + E/KT)} \tag{19}$$

取常温贮存温度为 20 ℃,最终得到中频对数放大器的常温贮存时间为 17.2 a。

4 结论

中频对数放大器的主要失效机理为其 GaAs 极管的栅金属下沉导致的电参数变化。通过运用失效物理的方法,分析其失效模型,得到其退化的时间方程。根据高温加速试验获得的数据,依照 GJB 3492—1998 确定的失效判据,得到其在高温环境中的失效时间为 350 h。拟合数据并对照常温观测数据计算出其激活能为 0.4507 eV,最终计算出中频对数放大器的常温贮存失效年限为 17.2 a,与观测数据相符,证实了模型的准确性,为今后的相关研究提供了参考。

参考文献:

[1] 黄云. GaAs 微波单片集成电路的主要失效模式及机理[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2002,1(3):37—39.

[2] 吴海东,庄志强,莫郁薇,等. GaAs MMIC 可靠性研究与进展[J]. 电子产品可靠性与环境试验. 2001,5(1):29—

33.

[3] YAMADA F M, OKI A, STREIT D, et al. Performance and Reliability of an Advanced Production GaAs HBT Process Technology[J]. GaAs ManTech Digest,2000,9(7):33—37.

[4] CRAMER H, OLIVER J, DIX G. MMIC Capacitor Dielectric Reliability[C]// Proceedings of GaAs Reliability Workshop,1998. IEEE,1998:46—51.

[5] 雷剑宇,霍佳倩,楚丽妍. 载人航天器关键电子产品综合环境应力试验[J]. 装备环境工程,2012,9(5):6—8.

[6] 范志峰,齐杏林,雷彬. 加速可靠性试验综述[J]. 装备环境工程,2008,5(2):37—39.

[7] SWANSON D. Thin-film Lumped-element Microwave Filters[C]// Microwave Symposium Digest,1989,IEEE MTT-S International. IEEE,1989:671—674.

[8] SCHNIEDER F, HEINRICH W. Model of Thin-film Microstrip Line for Circuit Design[J]. Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, 2001, 49 (1) : 104—110.

[9] TESSMANN A. 220-GHz Metamorphic HEMT Amplifier MMICs for High-resolution Imaging Applications[J]. Solid-State Circuits, IEEE Journal of, 2005, 40 (10) : 2070—2076.

[10] LEE T, WATSON K, CHEN F, et al. Characterization and Reliability of TaN Thin Film Resistors[C]// Reliability Physics Symposium Proceedings, 2004 IEEE International. IEEE, 2004:502—508.

[11] VINAYAK S, VYAS H P, MURALEEDHARAN K, et al. Ni-Cr Thin Film Resistor Fabrication for GaAs Monolithic Microwave Integrated Circuits[J]. Thin solid films, 2006, 514(1):52—57.