

# 一种 MOS 管自动功率老化测试系统的设计

杨修杰, 尹保来, 肖鹏, 刘浩峰

(中国测试技术研究院, 成都 610021)

**摘要:** 通过分析 MOS 管结温对器件可靠性的重要性, 指出现有老化方法在试验过程中未能达到最高允许结温, 老化不充分的问题; 提出了一种测试过程中实时测量 MOS 管导通电阻  $R_{DS(ON)}$  推断结温的老化方法, 使老化过程中受试器件的结温尽量控制在最高允许结温附近; 介绍了自动老化测试系统的构成及工作模式, 详细阐述了老化板的工作原理及老化参数标定的方法; 以型号为 IRFB4019 的 MOS 管作为试验对象, 对测试系统进行功能验证; 试验结果表明, 该老化方法试验过程受试器件结温可控, 能够将结温控制在最高允许温度附近, 可以更加有效地剔除存在潜在问题的器件, 与现有方法相比, 老化更充分。

**关键词:** 可靠性; MOS 管; 功率老化; 极限结温; 导通电阻

## Design of Automatic Power Aging Test System for MOS Transistors

Yang Xiujie, Yin Baolai, Xiao Peng, Liu Haofeng

(National Institute of Measurement and Testing Technology, Chengdu 610021, China)

**Abstract:** By analyzing the importance of PN junction temperature of MOS transistors to the reliability of devices, it is pointed out that the old method of power aging is inadequate; the maximum allowable junction temperature can't be reached in the test process. A test method is proposed, the junction temperature is deduced by measuring the on-resistance of the MOS transistor in real time during the testing process, so that the junction temperature of the tested device can be controlled as close as possible to the maximum allowable junction temperature during the aging process. The structure and working mode of the automatic aging test system are introduced. The working principle of the aging board and the method of calibrating the aging parameters are expounded in detail. The function of the test system is verified by testing IRFB4019. The test results show that the junction temperature of the tested device can be controlled during the aging process, the junction temperature can be controlled near the maximum allowable temperature, it can eliminate devices with potential problems more effectively, compared with the old methods, the new method can aging more fully.

**Keywords:** reliability; MOS transistors; power aging; ultimate junction temperature; on-resistance

## 0 引言

随着科技的不断进步, 电子技术的应用使智能化和自动化已成为我国人民日常生活的一部分。由于其应用的广泛性, 使用过程中如果发生大面积故障将造成无法估计损失, 其可靠性要求不断提高。半导体器件作为电子设备的核心, 其可靠性尤为重要。但是半导体器件制作工艺复杂性以及其寿命特点(浴盆失效概率), 很难从外观上检测其好坏<sup>[1]</sup>。特别是对于有大功率输出的电子产品, 功率器件在输送功率的同时, 器件本身也要消耗一部分功率, 这部分功率直接表现在使器件温度升高, 当温度升高到一定程度, 就会使器件烧坏。器件的生产过程中涉及诸多环节, 实际使用过程中在温升作用下难免发生故障, 因此在可靠性要求高的场合, 应该利用半导体器件的浴盆效应, 对驱动器件进行老化筛选, 在产品的设计生产前针对半导体器件

的功能及使用场景进行老化测试, 评估其质量, 提前将有问题的器件筛选出来, 提高电子产品的可靠性。针对 MOS 管类功率器件, 设计了一套极限结温自动老化测试系统, 根据 MOS 管的结温控制输出电流的状态, 实现被试 MOS 管的可靠性测试<sup>[2]</sup>。

## 1 测试原理

### 1.1 老化方法选择

功率器件工作过程中自身消耗的功率直接体现在产生热量, 升高结温, 如果器件内部结温与外部环境温度存在温差, 热量扩散到外部空间, 传递过程会有阻力, 定义为热阻, 热阻与环境温度、结温、和耗散功率有关, 具体为:

$$R_T = \frac{T_{jm} - T_a}{P_{cm}} \quad (1)$$

其中:  $R_T$  为热阻, 单位为  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ;  $T_{jm}$  为最高允许结温;  $T_a$  为环境温度;  $P_{cm}$  为环境温度为  $T_a$  时, 器件允许的最大耗散功率。

热阻对功率器件的使用影响较大, 热阻越小, 器件 PN 结所能承受的耗散功率越大, 设计中一般需要对热阻进行仔细计算。当功率器件壳体上装有散热片使用时,  $R_T$  由三部分组成,  $R_T = R_{jc} + R_{cs} + R_{sa}$ ,  $R_{jc}$  为结壳间热阻;  $R_{cs}$  为晶

收稿日期: 2019-06-06; 修回日期: 2019-07-05。

基金项目: 2018 年四川省科技厅半导体可靠性测试平台项目 (2018TJPT0009)。

作者简介: 杨修杰(1981-), 男, 山西大同人, 硕士, 助理研究员, 主要从事测控技术及可靠性方向的研究。

体外外壳与散热器间的热阻； $R_{sa}$ 为散热器与环境间的热阻，热阻一般较小。当功率器件不装散热片使用时， $R_T = R_{ja}$ ， $R_{ja}$ 为结与环境间的热阻，一般较大。 $R_{jc}$ 、 $R_{cs}$ 和  $R_{ja}$ 在器件手册中会给出<sup>[3]</sup>。

通常的器件老化方法的是采用稳态工作寿命法，具体为使器件工作在一定环境温度下，对其持续施加对应的  $P_{cm}$ ，试结温到达  $T_{jm}$ 。变换公式 (1) 为：

$$P_{cm} = \frac{T_{jm} - T_a}{R_T} \quad (2)$$

其中： $R_T$  对于特定器件手册中一般会给出。以公式 (2) 为基础计算老化参数，完成老化工作。另外研究表明，功率管达到某一累计失效概率  $F(t)$  的时间  $t$  和功率管结温  $T_j$  的关系满足方程<sup>[4]</sup>：

$$\ln(t) = A + B/T_j \quad (3)$$

式中， $A$ 、 $B$  为常数， $T_j$  为结温。由公式 (3) 可知， $T_j$  与器件的寿命有直接的关系。所以依据公式 (2) 为基础计算老化参数应该是一种比较理想的老化方法，但是由于半导体器件的热阻并非常数，器件手册中给出的热阻值是在一定条件下测试获得，另外器件手册给出的热阻值一般会大于实际的热阻值，通过公式 (2) 是无法准确计算出  $T_j$ ， $T_j$  是否在  $T_{jm}$  附近未知，无法实现在  $T_{jm}$  条件下对器件进行老化的目标，试验方法存在一定的缺陷。针对该缺陷设计了一套新的老化方法，通过实时测量  $T_j$ ，在一定的功率下运行，使  $T_j$  维持在  $T_{jm}$  附件，实现对受试 MOS 管的全面老化。

### 1.2 结温测量

测量  $T_j$  比较直观的方法是预置温度传感器直接测量法和红外热像法<sup>[5]</sup>。但是目前预置有温度传感器的成品器件几乎没有，直接测量无法实现；对于红外热像法，由于器件封装材料具有一定的热阻，红外热像法只能测量未封装的器件，不能测量成品器件。为了能够准确测量  $T_j$ ，需要有新的测量  $T_j$  的方法<sup>[6-8]</sup>。试验表明 MOS 管在导通状态下，其导通电阻  $R_{DS(ON)}$  与  $T_j$  存在一定的关系， $T_j$  越高  $R_{DS(ON)}$  越大。图 1 为 MOS 管 IRFB4019 归一化  $R_{DS(ON)}$  与  $T_j$  的关系曲线，图中可以看到在 25~175 °C 范围内，两者接近线性关系。对归一化  $R_{DS(ON)}$  与  $T_j$  关系线性化处理，通过测量  $R_{DS(ON)}$  即可推断  $T_j$ ，老化过程中可以实时测量  $R_{DS(ON)}$ ，最终确保  $T_j$  尽量接近  $T_{jm}$ 。

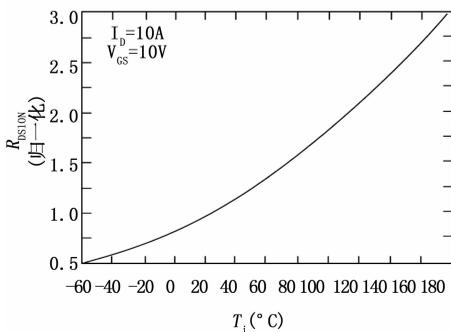


图 1 归一化  $R_{DS(ON)}$  与  $T_j$  关系曲线

## 2 系统设计

### 2.1 系统结构

为了节约能源，被试器件不加散热器进行老化测试。自动老化测试系统由人机交互接口单元、电源系统和老化板三部分构成。根据需要扩展老化板，实现多工位并联测试，系统结构如图 2 所示。

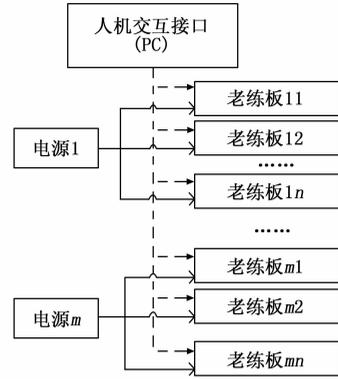


图 2 MOS 管老化测试系统结构框图

整个系统的分工为：1) 人机交互接口通过 RS485 总线与老化板进行通信，实现老化数据的下载和老化状态的实时显示；2) 电源系统采用可调电源为老化板提供工作电源，根据受试器件确定电源参数；3) 为了保证实时性，每一块老化板可以按要求自主负责一个受试器件的老化工作，并将老化状况实时传输到人机交互接口。

系统设计了两种工作模式，一种模式为恒定功率老化模式，受试器件在一定的功率下工作， $T_j$  一直处在  $T_{jm}$  附近，老化时长根据需要可任意设定；另一种模式为循环加热老化模式，受试器件在一定的加热功率下工作，当  $T_j$  达到  $T_{jm}$  附近时，停止加热，切换到测量状态，当  $T_j$  降温到某一设定值时再次启动加热功率，循环次数根据需要可任意设定<sup>[9]</sup>。

### 2.2 硬件设计

老化板是测试系统硬件的设计重点，其关键是测量 MOS 管的导通状态  $R_{DS(ON)}$ ，结构框图如图 3 所示。

当老化板处于恒定功率老化模式时，通过控制恒压源 ( $V_{gs}$ )，使受试器件处于导通状态，恒流源 1 输出恒定电流通过受试器件“漏极—源极”，使其结温升高，通过 AD2 测量  $V_{DS}$  (“漏极—源极”间电压)，计算结温  $T_j$ ，最终使  $T_j$  达到  $T_{jm}$  附近。采样电阻测量  $I_{DS}$  (流过受试器件“漏极—源极”电流)，AD1 测量采样电阻两端的电压，计算  $I_{DS}$ ，此时受试器件的耗散功率为  $P = V_{DS} \times I_{DS}$ ，处理器实时计算受试器件的耗散功率，防止由于老化参数设置错误或其它原因，烧坏受试器件<sup>[10]</sup>。

当老化板处于循环加热老化模式时，加热过程与恒定功率老化模式相同，不同之处在于当  $T_j$  达到  $T_{jm}$  附近时，

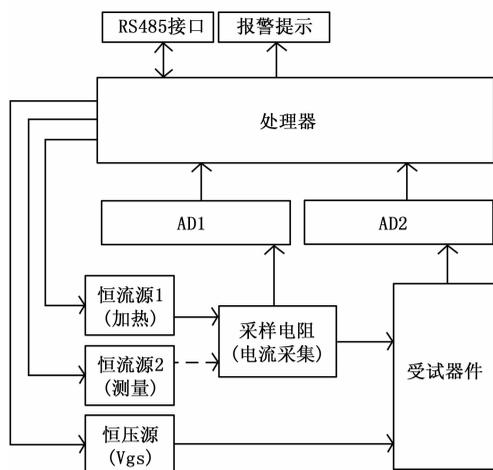


图 3 老化板结构框图

将流过受试器件“漏极—源极”间的电流由恒流源 1 切换到恒流源 2, 恒流源 2 电流值设置较小, 主要为实时测量  $T_j$  而设置, 对受试器件结的加热作用可以忽略不计。随着受试器件结温的下降, 当达到设定值后再次切换至恒流源 1, 如此循环加热完成受试器件的老化。

老化板上的处理器负责 3 项工作, 1) 计算受试器件的耗散功率及结温, 根据计算结果及工作模式设置, 控制电流源的切换; 2) 计算老化过程中器件的状态, 当出现故障时, 终止老化, 并报警指示; 3) 通过 RS485 总线方式与人机交互接口进行通信。

### 2.3 软件设计

老化测试系统运行在 PC 端的管理软件较为简单, 主要负责人机交互工作和数据存储, 所有测量计算工作全部由老化板完成。软件运行开启后, 当被测 MOS 管的老化参数已知时, 选择“老化模式”, 直接将老化参数下载到老化板中, 由老化板自主完成任务, 并将老化情况实时显示在 PC 端。当不知道被测 MOS 的老化参数时, 选择“标定模式”, 按照标定流程测试老化参数, 当获得老化参数后, 在“老化模式”下完成 MOS 的老化工作<sup>[11]</sup>。

## 3 工作流程

### 3.1 参数标定

MOS 管种类繁多, 不同的型号的管子具有不同的参数, 系统设计具有一定的通用性, 对于一个新的型号 MOS 管进行老化时, 首先需要对老化参数进行标定, 确定老化参数。老化参数标定可以在任意一块老化板上完成, 当标定工作完成后, 将标定获取的老化参数下载到老化板, 老化板自行完成老化工作。对于已知老化参数的 MOS 管可以不进行标定工作, 直接开始老化。

#### 3.1.1 恒定功率老化模式参数标定

首先依据公式 (2), 确定在老化环境温度  $T_a$  下, 当  $T_j$

达到  $T_{jm}$  时, MOS 管结允许的最大耗散功率  $P_{cm}$ ; 其次依据已线性化处理的受试器件归一化  $R_{DS(ON)}$  与  $T_j$  的关系曲线确定结温  $T_j$  为  $T_{jm}$  时的  $R_{DS(ON)}$ , 根据  $P=I^2R$  初步确定恒定功率老化模式的加热电流  $I_{H1}$ 。由于手册中给出的热阻具有一定的条件性, 非常数,  $P_{cm}$  为估计值, 由此得出的  $I_{H1}$  与最终的老化电流  $I_H$  必然存在一定的差异, 需要不断调试获取最终老化条件。将  $I_{H1}$  作为老化参数下载到标定样件上, 当达到稳态后, 观察受试器件“漏极—源极”间的电阻值与  $T_j$  为  $T_{jm}$  时的  $R_{DS(ON)}$  关系, 适当调整加热电流反复试验, 最终获得老化加热电流  $I_H$ , 使老化稳态后, 受试器件“漏极—源极”间的电阻值与  $T_j$  为  $T_{jm}$  时的  $R_{DS(ON)}$  接近。

#### 3.1.2 循环加热老化模式参数标定

循环加热老化模式的参数标定过程与恒定加热老化模式基本相同, 不同之处在于加热电流可以在  $I_{H1}$  基础上有较大的增加, 增加量的大小可以根据循环快慢确定, 但  $I_H$  的最大值不应超过器件的安全工作电流。  $I_H$  的最终值也需要反复试验, 明确截止加热条件。

### 3.2 老化测试

老化测试主要由老化板根据运行在 PC 端的管理软件下载的老化参数自主完成, 老化板内置 MOS 管失效判断条件, 当出现被老化 MOS 管在未老化完成的情况下已失效时, 中断有问题的受试器件的老化, 并报警。管理软件巡检各老化板的运行数据并显示, 同时管理软件具备终止老化权限。需要注意的是由于同一型号的 MOS 管的  $R_{DS(ON)}$  存在一定的个体差异, 如果对老化要求不高的情况下, 可以引用手册提供的典型  $R_{DS(ON)}$  值计算所有受试器件的老化参数。当要求较高的情况时, 需要对每个器件单独参数标定。

## 4 试验验证

为了验证老化测试系统的工作状态, 以 MOS 管 IRFB4019 为老化对象。IRFB4019 的手册给出 25 °C 时  $R_{DS(ON)}$  典型值为 80 mΩ,  $R_{\theta ja}$  为 62 °C/W, 在不加散热器的情况下, 通过公式 (2) 计算得 IRFB4019 的最大允许耗散功率约为 2.5 W。依据线性化处理的归一化  $R_{DS(ON)}$  与  $T_j$  的关系曲线, 175 °C 时  $R_{DS(ON)}$  约为 236 mΩ。根据功率计算公式获得对应的加热电流约为 3.2 A。将 3.2 A 作为老化加热电流, 当结温稳定后测得  $R_{DS(ON)}$  为 137 mΩ, 显然在 25 °C 环境温度下 3.2 A 电流不能将 IRFB4019 加热到最高结温 (175 °C), 验证了现有老化方法  $T_j$  不能达到  $T_{jm}$  的缺陷。经反复调试, 将加热电流调整到 3.8 A 后, 当结温稳定时  $R_{DS(ON)}$  在 236 mΩ 附近波动, 接近 175 °C, 符合老化需求。图 4 为 IRFB4019 的参数标定曲线, 标定结果可用于恒定功率老化模式下运行。

(下转第 60 页)