

GaAs MESFET 可靠性及快速评价新方法的研究

李志国 宋增超 孙大鹏 程尧海 张万荣 周仲蓉

(北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100022)

摘要: 提出了一种快速评价 GaAs FET 可靠性寿命的新方法。利用 GaAs FET 失效敏感参数的温度特性和在一定电应力下的退化特性, 及温度斜坡法在线快速提取器件失效敏感参数的退化量与温度的关系, 从而进一步求出器件的失效激活能等相关的可靠性物理参数。

关键词: GaAs FET; 失效机理; 快速评价

PACC: 0170; 8170

中图分类号: TN306

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)08-0856-05

1 引言

微电子器件可靠性评价和可靠性寿命试验是微电子器件可靠性物理和可靠性工程主要的研究内容。各国采用的方法有所不同。美国按照 MIL-STD-883E 标准^[1]进行可靠性寿命试验评价或按 MIL-STD-217F 标准^[2]进行可靠性失效率预计; 俄罗斯采用首次故障时间对微电子器件进行可靠性评价; 我国参照美国标准, 根据自己的国情制定了相应的标准 GJB 548A-96^[3] 和 GJB/Z 299B^[4]。但这些标准的试验周期长, 所需样品数量多, 成本高; 而可靠性预计手册针对产品的预计批次性不强, 预计的误差较大, 目前争议也较多。特别是对重点工程和军工急需的质高、价贵、量少的电子产品, 进行了工艺、结构和设计改进的老品以及试制周期短的新品, 要了解它们的可靠性现状和相关的可靠性参数, 如可靠性寿命、失效激活能等, 显然常规方法不能满足现实的要求。

当以温度作为加速应力进行恒定应力加速寿命试验时, 国内外普遍采用 Arrhenius 方程, 即采用多样品、多温度点得到相关系数后外推出正常工作温度下的寿命和失效率。该方法所需样品数量多, 试验周期长, 成本高。本文利用 GaAs FET 失效的敏感参数 I_{DSS} 的温度特性和在一定电热应力下的退化特

性, 快速、实时地提取出 I_{DSS} 的退化量与温度的关系等相关信息, 能快速确定 GaAs FET 的失效激活能 Q 等可靠性参数, 得到相关可靠性的信息, 使产品的性能、可靠性得到及时改进。

2 理论

微电子器件参数的退化是由器件内部物理和化学变化引起的, 当这种变化积累到一定程度时即发生失效。退化经历的时间即产品的寿命, 根据 Arrhenius 方程:

$$dM/dt = A \exp(-Q/kT) \quad (1)$$

反应速率 dM/dt 随温度按指数规律变化, 而这个反应速率正反映了器件参数的退化速率, 器件参数的退化速率反映了器件寿命的长短, 故器件寿命与温度的关系遵从 Arrhenius 方程。

设微电子器件某一参数的退化速率 dP/dt 服从 Arrhenius 方程, 同时考虑到器件的退化与施加的电流应力和电压应力有关, 则:

$$1/MTF \propto dP/dt = Aj^n V^m \exp(-Q/kT) \quad (2)$$

这里 Q 为失效激活能; k 为波尔兹曼常数; T 为绝对温度; n 为电流密度指数因子, 电流产生的退化可转换成焦尔热来考虑; m 为电压的幂指数。设 P_0 为参数退化前的初始值, 则:

$$(dP/dt)/P_0 = A'j^n V^m \exp(-Q/kT) \quad (3)$$

李志国 男, 1940 年出生, 教授, 博士生导师, 当前主要从事微电子器件可靠性研究。

2002-10-12 收到, 2003-01-10 定稿

©2003 中国电子学会

$A' = A/P_0$, 采用温度斜坡法, 即对器件施加按一定速率 β 上升的温度斜坡, 则 t 时刻器件的结温为: $T(t) = T_0 + \beta t + \Delta T$, T_0 为初始的环境温度, β 为升温速率, ΔT 为微电子器件施加一定的电应力后由焦尔热引起的温升。由 $dT = \beta dt$ 可得到: $dt = dT/\beta$, 并代入(3)式后, 得:

$$dP/P_0 = \frac{A'}{\beta} j^n V^m \exp(-Q/kT) dT \quad (4)$$

对(4)式两边积分, 得:

$$\frac{1}{P_0} \int_{P_0}^P dP = \frac{A' j^n V^m}{\beta} \int_{T_0}^T \exp(-Q/kT) dT \quad (5)$$

因 $Q/kT \gg 1$, 则有:

$$\int_{T_0}^T \exp(-Q/kT) dT = \frac{k}{Q} [T^2 \exp(-Q/kT) - T_0^2 \exp(-Q/kT_0)]$$

因为 T_0 较小, $T^2 \exp(-Q/kT) \gg T_0^2 \exp(-Q/kT_0)$, 故上式第二项可以忽略。

对(5)式两边积分后, 得:

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \frac{A' j^n V^m k T^2}{\beta Q} \exp(-Q/kT) \quad (6)$$

对(6)式两边取对数, 得:

$$\ln(T^{-2} \frac{\Delta P}{P_0}) = \ln \left[\frac{A' j^n V^m k}{\beta Q} \right] - Q/kT$$

$$\ln(T^{-2} \frac{\Delta P}{P_0}) = \ln C - \frac{Q}{k} \times \frac{1}{T}$$

其中 $C = \frac{A' j^n V^m k}{Q \beta}$

在实验过程中保持电流密度 j 和电压 V 不变, 同时假设 Matthiesen 规则成立, 电参数为温度的函数, 可将电参数的温度相关项和退化相关量分开, 并相互独立。做 $\ln(T^{-2} \Delta P/P_0)$ 与 $1/T$ 曲线, 找出曲线的线性段, 并经线性拟合得到一直线, 设直线的斜率为 S , 则 $Q = -kS$, Q 即为器件的失效激活能。

3 实验系统

根据本方法设计了一套以 PC-586 作为主机控制, 以国际通用接口(GP-IB) IEEE-488 总线为数据通讯基础, 在 HP-VEE 环境下用可视化图形编程语言编制的试验程序, 从而实现对双路程控电源 HP6634A 和 HP6035A 以及程控万用表 HP3457A 和加热平台的自动控制, 完成对试验数据的实时测量、保存和显示, 如图 1 所示。另外, 为了避免器件加

热时对防震电路的影响, 采用加热平台, 减少实验过程中对外围防振电路的加热。加热平台由加热电炉、热沉、金属隔离片、热电偶、防自激电路板和 ITC 智能温控仪组成, 如图 2.3 所示。

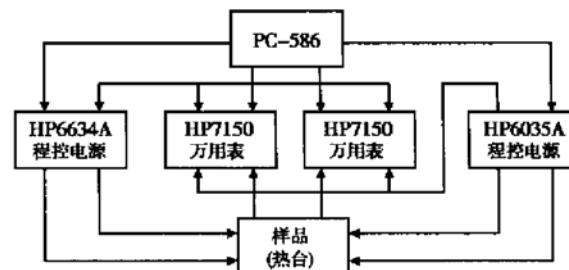


图 1 测试系统框图

Fig. 1 Testing system block diagram

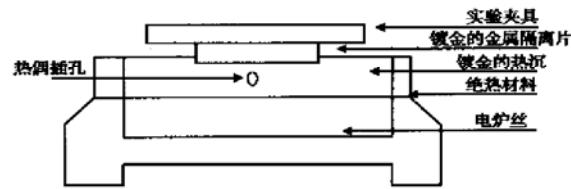


图 2 加热平台截面图

Fig. 2 Sectional diagram of heating platform

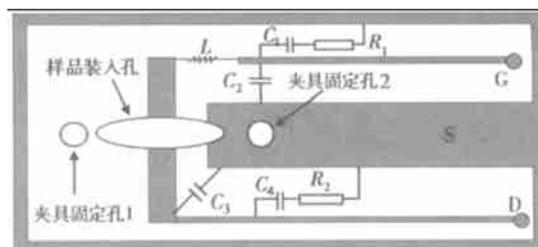


图 3 测试夹具及防震电路俯视图

Fig. 3 Top view of testing clamps and vibration-proof circuit

t 时刻器件结温的测量: T_0 为试验开始时热沉的温度, 可由热电偶测得。实验过程中 t 时刻热沉的温度为: $T_0 + \beta t$ (由温控仪控制)。器件施加电应力后的焦尔热温升 ΔT , 通过测量器件温敏参数 V_{gs} - T 的关系曲线得出。由此可得到 t 时刻器件的结温为: $T(t) = T_0 + \beta t + \Delta T$ 。

4 结果和讨论

采用上述实验系统, 对低噪声 GaAs FET CX672B 和功率 GaAs FET DS0011 等样品进行了实

验研究, 观察到了如下现象, 得到了相应的失效激活能 Q , 并与常规方法得到的结果进行了比较。

(1) 对低噪声 CX672B 按 $V_{DS} = 3V$, $I_{DS} = 70mA$, 每 4 小时 1°C 的升温速率进行温度斜坡应力的寿命试验, I_{DSS} 随温度变化(退化)的曲线如图 4 所示。 I_{DSS} 随温度的变化明显地出现了四段退化(减小)、恢复(上升)区域, 这四段的温度范围是 $200\sim 219^{\circ}\text{C}$, $219\sim 255^{\circ}\text{C}$, $255\sim 281^{\circ}\text{C}$, $281\sim 292^{\circ}\text{C}$, 292°C 以后出现连续的退化, 直至失效。值得注意的是在 $\ln(\Delta I_{DSS}/T^2 I_{DSS}) - 1/T$ 的图中(见图 5), 出现了三段线性区, 即 $219\sim 231^{\circ}\text{C}$, $255\sim 267^{\circ}\text{C}$, $281\sim 292^{\circ}\text{C}$, 其相对应的失效激活能分别为 0.96eV , 1.14eV 和 1.17eV , 数值非常接近, 说明该器件在 $200\sim 292^{\circ}\text{C}$ 温度范围内有相同的失效机理。不过出现了几次退化和恢复的过程后, 直至高于 292°C 后急剧退化。另外, 试验过程中, 栅始终处于受控状态, 即栅未失效。

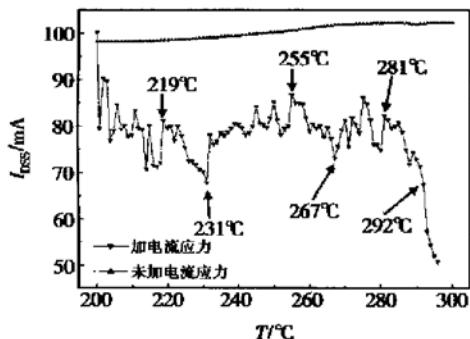


图 4 CX672B I_{DSS} 的温度特性

Fig. 4 Temperature property of I_{DSS} for CX672B

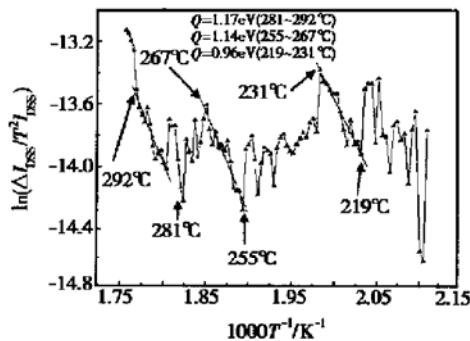


图 5 CX672B 的 $\ln(\Delta I_{DSS}/T^2 I_{DSS}) - 1/T$ 曲线

Fig. 5 $\ln(\Delta I_{DSS}/T^2 I_{DSS})$ versus $1/T$ for CX672B

(2) 功率 GaAs FET DS0011 与低噪声 GaAs FET CX672B 不同, 在 $200\sim 236^{\circ}\text{C}$ 间, I_{DSS} 出现 $2\sim 3$

段退化-恢复区域, 在 236°C 以后则出现连续退化区域, 如图 6 所示, 说明低噪声和功率 GaAs FET I_{DSS} 随温度逐渐升高的退化规律不同。低噪声 GaAs FET 的 S.D.G 金-半接触面积小, 其相对应的材料缺陷数也较少, 在退化过程中出现的小孔和空洞等缺陷易于恢复, 即驰豫现象明显。而功率 GaAs FET 在采用同样材料的情况下, S.D.G 金-半接触面积较大, 材料缺陷数相对较多, 又由于功率 GaAs FET 温度分布的不均匀性更为突出, 金-半接触处出现的小孔、空洞几率增多, 恢复几率减小, 故 I_{DSS} 出现连续的退化现象。在 $\ln(\Delta I_{DSS}/T^2 I_{DSS}) - 1/T$ 的图中仅出现了一段线性区, 有单值的失效激活能, 如图 7 所示。

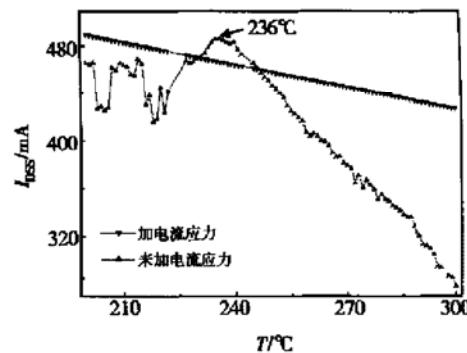


图 6 DX0011 I_{DSS} 的温度特性

Fig. 6 Temperature property of I_{DSS} for DX0001

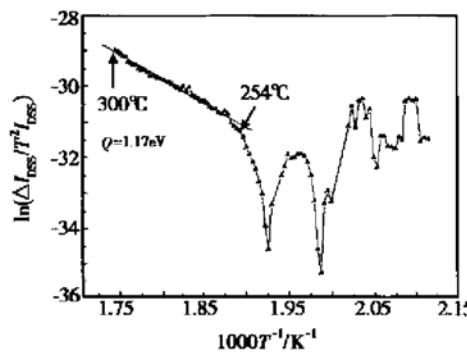


图 7 DX0011 的 $\ln(\Delta I_{DSS}/T^2 I_{DSS}) - 1/T$ 曲线

Fig. 7 $\ln(\Delta I_{DSS}/T^2 I_{DSS})$ versus $1/T$ for DX0001

(3) 新方法用于 CX672B 欧姆接触有和无 Pt 阻挡层的对比试验

本方法对具有相同的栅结构, 而欧姆接触有、无 Pt 阻挡层的低噪声 GaAs FET CX672B 进行了对比试验, 试验结果如表 1 所示。

表 1 有、无 Pt 阻挡层样品的失效激活能 Q

Table 1 Parameters for activating energy to failure of samples with and without Pt isolating films

样品	无阻挡层		Pt 阻挡层					
	2#	4#	2#	3#	4#	6#	7#	9#
Q/eV	0.94	0.67	0.97	1.32	0.65	1.93	1.26	0.72
平均 Q/eV	0.80		1.14					

实验过程中发现, 无 Pt 阻挡层的样品易烧毁, 部分样品得不到最后数据. 而有 Pt 阻挡层的样品, 抗烧毁能力强, 试验过程中烧毁数量少, 得出的试验数据较多. 说明 Pt 阻挡层有效地阻挡了 Au 的内扩散和 GaAs 的外扩散, 有效地提高了 AuGeNi 欧姆接触的可靠性, 使器件的寿命提高了一个数量级.

(4) 新方法用于 CS0531 两种栅结构(TiPtAu 栅和 TiAl 栅) 器件的对比试验

本方法对具有相同的欧姆接触金属化系统(AuGeNi)而具有不同栅结构(TiPtAu 栅和 TiAl 栅)的功率 GaAs FET CS0531 进行了对比试验, 试验结果为 TiPtAu 栅和 TiAl 栅 CS0531 GaAs FET 样品的失效激活能分别为 1.40eV 和 0.84eV.

在试验过程中已明显观察到 TiPtAu 栅的抗电迁移能力优于 TiAl 栅, 这是由于 Au 的抗电迁移能力优于 Al 所致, 试验结果证明了这一结论.

(5) 新方法与常规方法的对比试验

采用 DX0011 功率 GaAsFET 对新方法和常规方法进行了对比试验. 试验样品由中国电子科技集团 13 所提供. 常规方法的数据取自文献[5]. 两种方法均是对同一型号的产品 DX0011 进行测量. 新方法共对 4 只样品进行了试验, 试验结果如表 2 所示.

试验结果得出的 $Q = 1.38\text{eV}$ 与文献中的报道 $Q = 1.28\text{eV}$ 非常吻合.

表 2 两种试验方法求 DS0011 失效激活能 Q 的对比结果

Table 2 Parameters of Q figured out by different method

		DS0011				
型号		524#	529#	531#	532#	平均
Q/eV	新方法	1.94	1.17	1.45	0.96	1.38
	常规方法			1.28 ^[5]		1.28 ^[1]

5 结论

(1) 本文提出了一种新的微电子器件快速评价方法, 它具有快速、准确、成本低, 能观察分析参数退化的全过程, 能有效地分析器件的失效机理等优点. 与常规方法相比, 它可对单样品求出失效激活能, 根据其参数退化的温度范围可外推出单样品工作条件下的寿命. 通过一定数量的对比试验, 本方法与常规方法有可比性.

(2) 欧姆接触具有 Pt 阻挡层的 GaAs FET 的失效激活能 Q 大于无 Pt 阻挡层的 GaAs FET, 其可靠性高, 寿命长.

(3) TiPtAu 栅 GaAs FET 的可靠性优于 TiAl 栅的 GaAs FET.

参考文献

- [1] MIL-STD-883E Test methods and procedures for microelectronics
- [2] MIL-STD-217F Reliability Prediction handbook for electronic equipment
- [3] Test methods and procedures for microelectronics [国军标 GJB 548-96 微电子器件试验方法和程序]
- [4] Reliability Prediction handbook for electronic equipment [国军标 GJB/Z 299B-98 电子设备可靠性子计手册]
- [5] Xu Lisheng, He Jianhua, Su Wenhua, et al. Semiconductor Information, 1995, 32(1): 24 [徐立生, 何建华, 苏文华, 等. 半导体情报, 1995, 32(1): 24]

GaAs MESFET's Reliability and New Method of Rapid Evaluation

Li Zhiguo, Song Zengchao, Sun Dapeng, Cheng Yaohai, Zhang Wanrong and Zhou Zhongrong

(College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: A new method for rapid evaluation of reliability of GaAs FET is proposed. Basing on the temperature characteristics of GaAs FET's sensitive parameters for failure and its degrading characteristics under certain electrical stress, the relationship between the temperature and the degradation of sensitive parameters is extracted from the line through the method of temperature slope, then the related reliability physics parameters such as activating energy to failure can be figured out.

Key words: GaAs FET; failure mechanism; rapid evaluation

PACC: 0170; 8170

Article ID: 0253-4177(2003)08-0856-05

Li Zhiguo male, was born in 1940, professor. His current research interest is in the reliability of microelectronics devices.

Received 12 October 2002, revised manuscript received 10 January 2003

©2003 The Chinese Institute of Electronics