

电迁徙参数—电流密度因子电流斜坡测试法*

李志国 孙英华 邓 燕 张 炜 程尧海 郭伟玲 张万荣

(北京工业大学电子工程系 北京 100022)

摘要 本文对电迁徙参数电流密度因子 n 及 n 值的精确测量技术进行了深入研究。首次提出了动态电流斜坡电流密度因子测试法(DCR)。该方法与传统的 MTF 法不同,能精确控制金属条温,消除了高电流密度条件下焦耳热的影响,提高了 n 值的测量精度与速度。研究了四种不同样品直流和脉冲条件下的 n 值。实验结果表明, n 值与材料、频率、占空比有关,与温度、一定范围内的电流密度无关。

PACC: 6610, 0620; EEACC: 0170N

1 引言

目前,已经公认 Black 电迁徙方程是预测金属条薄膜中值寿命的经典公式,已被广泛使用。在 Black 方程中有两个关键的参量,金属材料电迁徙激活能 Q 和电流密度因子 n ,这两个值的精确与否直接影响到金属条薄膜寿命的准确预测。其中,关于激活能 Q 众多学者已进行了大量的研究,常用半导体器件金属材料的激活能绝大多数得到了系统测量,并取得了公认的数值。有关 Q 的测量方法层出不穷,由原始的 MTF 法到电阻测试法^[1],BEM 法^[2],噪声法^[3]等等。然而,对另一有关得到寿命预测的主要参数电流密度因子 n 研究不多,在已发表的数值上也存在较大分歧。即使常用的 Al 金属化 n 因子的测量结果也存在较大差别,从 1 到 7,非常离散^[2,4,5,6]。一般认为它取决于电流密度、薄膜温度、温度梯度以及薄膜金属条的几何形状。而 Black 方程认为 n 值是和结构材料相关的参数,而与应力条件无关。

在实际电路中,VLSI 和各种器件多在脉冲和交流条件下工作。因此,研究脉冲和交流条件下的可靠性更具有实际意义。但对脉冲和交流条件下 n 因子的研究和测量技术尚未见到报道。因此,开展各种条件下电流密度因子 n 及相关精确测量技术的研究便显得尤为重要。

2 理论

测量 n 值的方法主要有 MTF 法^[5]和电阻法^[7]。MTF 法是根据电迁徙寿命 MTF 与电

* 国家自然科学基金资助项目

李志国 男,1940 年生,教授,现从事微电子器件可靠性研究与教学工作

1996 年 8 月 23 日收到初稿,1997 年 4 月 8 日收到修改稿

流密度 j 的关系得到 n 值, 其理论基础是 Black 方程:

$$MTF = \frac{A}{j^n} \exp(-Q/kT) \quad (1)$$

本文在电阻法的基础上提出了动态电流斜坡电流密度因子测试法(DCR).

DCR 法假设:(1)金属条电阻变化遵守 Matthiessen 规则^[8], 即电阻能分解成温度相关项 R_T 和电迁徙相关项 R_{em} 之和, 而且这两项相互独立.(2)忽略金属条中电迁徙空洞对电流密度的影响.(3)金属条温度保持恒定, 温度梯度可以忽略(由计算机实时调节实现).

由假设(1)得到金属条电阻:

$$R[T(t), t] = R_T[T(t)] + R_{em}[T(t), t] \quad (2)$$

由假设(3)得到:

$$R[T_0, t] = R_{T0} + R_{em}[T_0, t] \quad (3)$$

则

$$R_{em} = R[T_0, t] - R_{T0} \quad (4)$$

实验中采用电流斜坡应力 $I(t) = \beta_1 t$, 则电流密度 $j = I/s = \beta_1 t/s = \beta t$ (β 为常数), 求导数可得:

$$dt = dj/\beta \quad (5)$$

电阻测量法已被广泛用于电迁徙动力学研究, 与 MTF 测量相比, 动力学过程仅在电迁徙的早期阶段相符合, 即电阻值变化 5%~15% 的初始阶段. 为此, 根据阿伦尼乌斯关系^[1](即零阶电阻法)可得到下式:

$$\frac{1}{R_0} \frac{dR_{em}}{dt} = A j^n \exp(-Q/kT) \quad (6)$$

将(5)式代入(6)式, 并将公式两边积分:

$$\int_0^{R_{em}} dR_{em} = \frac{AR_0}{\beta} \exp(-Q/kT) \int_0^j j^n dj$$

$$R_{em} = \frac{AR_0 \exp(-Q/kT)}{\beta(n+1)} j^{n+1} \quad (7)$$

(7)式两边取对数得到下式:

$$\ln R_{em} = \ln C + (n+1) \ln j \quad (8)$$

其中 $C = \frac{AR_0 \exp(-Q/kT)}{\beta(n+1)}$ 为常数.

对于脉冲直流的电迁徙特性通常采用 Black 方程的变化形式^[9]:

$$MTF_{pulse-DC} = \frac{A}{j^n D^m} \exp(Q/kT) = \frac{MTF_{DC}}{D^m} \quad (9)$$

式中 D 为占空比; m 为常数.

对于脉冲直流情况, 根据(1)式与(9)式的对应关系, 运用阿伦尼乌斯关系:

$$\frac{1}{R_0} \frac{dR_{em}}{dt} = AD^m j^n \exp(-Q/kT) \quad (10)$$

经过类似的推导, 可得:

$$\ln R_{em} = \ln C' + (n+1) \ln j \quad (11)$$

其中 $C' = \frac{AD^m R_0 \exp(-Q/kT)}{\beta(n+1)}$ 为常数.

通过(8)式和(11)式可以看出 $\ln R_{em}$ 和 $\ln j$ 为线性关系, 计算出斜率减一, 即为 n 值.

3 实验和结果

本实验需要注意两点: (1) 因假设金属条截面积不随时间变化, 即忽略了金属条电迁移引起的空洞效应. 这一假设只在电迁移早期阶段成立, 所以实验中金属条电阻增量限制在 15% 之内. (2) 实验的关键在于精确控制金属条温恒定, 从而消除焦耳热的影响.

3.1 实验样品

实验样品采用长 1mm, 宽 5 μm , 厚约 700nm 的金属条, 淀积在热氧化的 SiO_2 上. 样品共设计了四种金属化系统: (1) Al-1%Si(700nm), (2) Ti(25nm)/Al-1%Si(700nm), (3) Al-1%Si-2%Cu(700nm), (4) Al-1%Si(350nm)/TiWTi(45nm)/Al-1%Si(350nm). 在金属条的表面不做钝化, 但在金属条正下方扩散形成一条形温敏电阻, 用于控制金属条的温度.

3.2 实验系统

本实验采用一套 IBM-PC 计算机, PMC-CA 控制器, 程控温箱, 程控电流源, 程控电表, 脉冲信号发生器, 示波器, 恒压电源组成的电迁移自动测试系统, 可自动调温, 能提供多种应力.

3.3 实验条件和结果

3.3.1 不同样品 n 值

实验温度 $T = 150^\circ\text{C}$, 电流时间变化率 $\beta_1 = 1.5\text{mA/min}$, 频率 $f = 0$, 四种样品电迁移引起的电阻增量 R_{em} 的对数与电流密度 j 对数关系曲线见图 1. Al-Si、Ti/Al-Si、Al-Si-Cu、Al-Si/TiWTi/Al-Si 四种样品的 n 值分别为 2.25 ± 0.04 、 1.48 ± 0.05 、 1.32 ± 0.06 、 1.15 ± 0.05 .

3.3.2 不同温度下的 n 值

在 $\beta_1 = 1.5\text{mA/min}$, $f = 0$ 时, Al-Si/TiWTi/Al-Si 样品做不同温度下的电流斜坡实验, 得到 $\ln R_{em}$ 与 $\ln j$ 的关系曲线, 见图 2. 从图中可见, 各条曲线斜率基本相同, 不同温度下的 n 值为 80°C (1.12 ± 0.05)、 100°C (1.17 ± 0.04)、 130°C (1.11 ± 0.06)、 150°C (1.14 ± 0.04)、 180°C (1.10 ± 0.05).

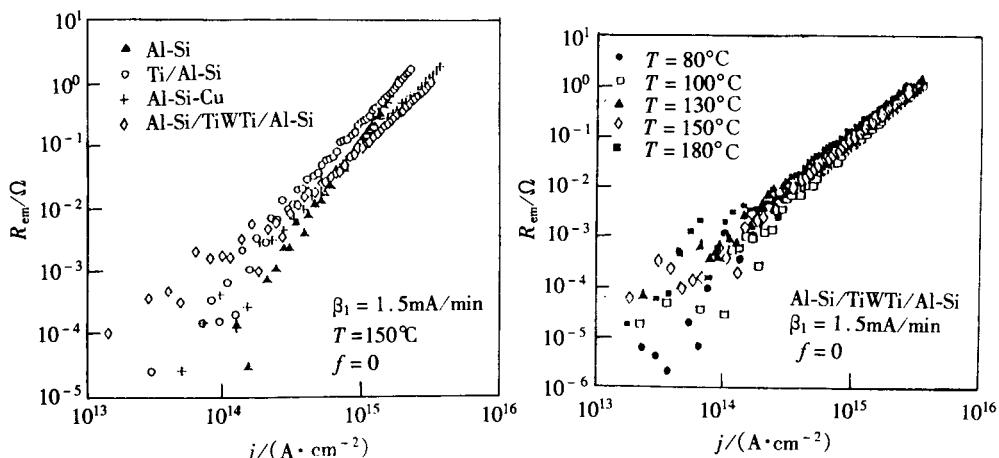


图 1 不同样品的 $\ln(R_{em})$ - $\ln(j)$ 曲线

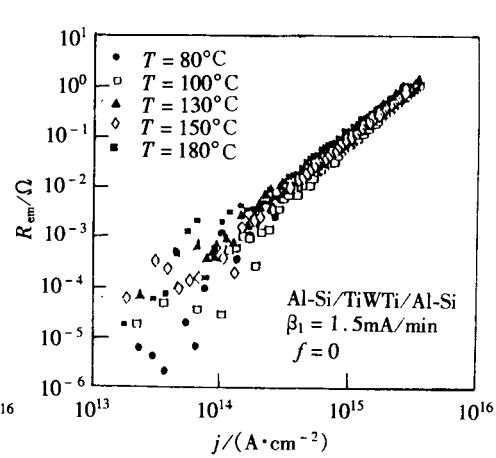


图 2 不同 T 时 $\ln(R_{em})$ - $\ln(j)$ 曲线

180°C (1.16 ± 0.03). 再将数据画成曲线, 见图 3.

3.3.3 不同斜坡电流下的 n 值

在温度 $T = 100^{\circ}\text{C}$, $f = 0$, 对 Al-Si 样品做电流斜坡 $\beta_1 = 0.874\text{mA/min}$ 和 1.648mA/min 的电迁移实验, $\ln R_{\text{em}}$ 与 $\ln j$ 关系曲线重合, 表明有相同的 n 值, 见图 4.

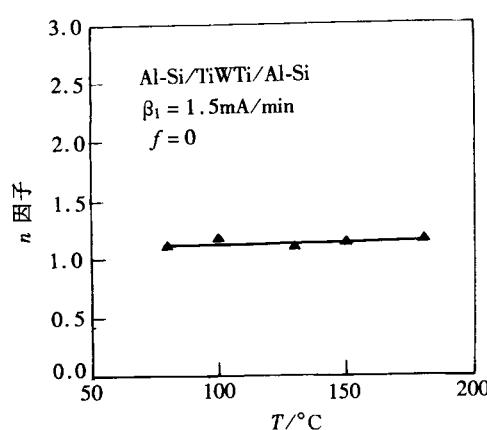


图 3 n - T 关系图

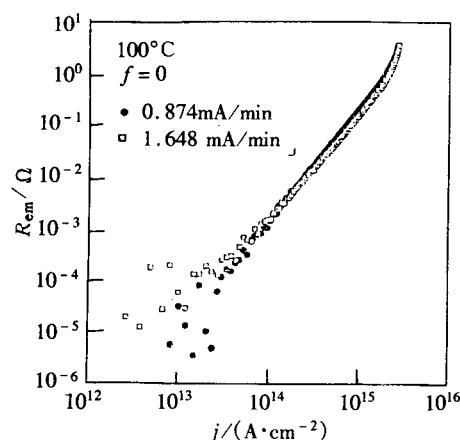


图 4 不同电流下 $\ln(R_{\text{em}})$ - $\ln(j)$ 关系

3.3.4 不同占空比 D 时的 n 值

$T = 150^{\circ}\text{C}$, $\beta_1 = 1.5\text{mA/min}$, $f = 1\text{kHz}$, 样品 Al-Si-Cu 做不同占空比 D 的脉冲直流斜坡实验, 得到 $\ln R_{\text{em}}$ 与 $\ln j$ 关系曲线. 当 D 分别为 20% 、 40% 、 60% 、 80% 时, 其相对应的 n 值为 1.16 ± 0.05 , 1.24 ± 0.06 , 1.31 ± 0.04 , 1.38 ± 0.07 . 将数据画成曲线, 见图 5.

3.3.5 不同频率下的 n 值

在 $T = 150^{\circ}\text{C}$, $\beta_1 = 1.5\text{mA/min}$, $D = 50\%$ 的条件下, 对 Ti-Si 样品做不同频率 f 的脉冲直流电流斜坡实验, 得到不同频率下的 n 值, 画成曲线如图 6 所示.

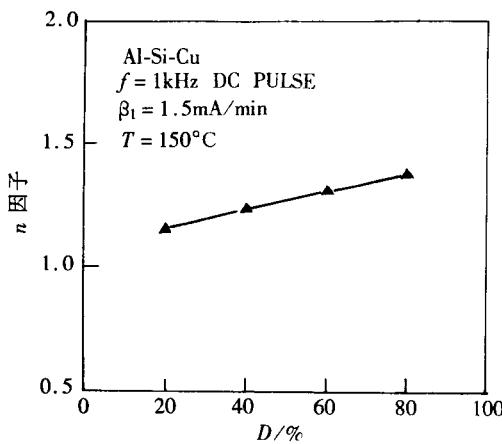


图 5 n - D 关系图

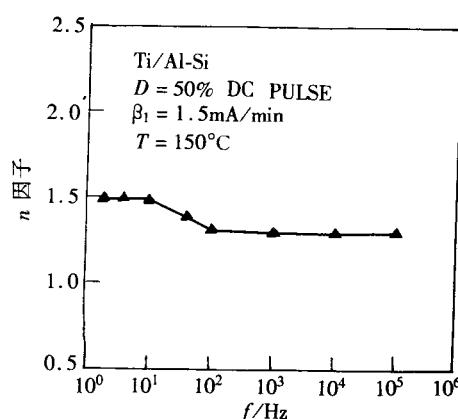


图 6 n - f 关系图

4 结果分析与讨论

4.1 n 与材料的关系

n 值的大小主要由材料及材料抗电迁移能力的强弱决定。在实验的四种材料中，由于 Ti 有较强的抗电迁移能力，当在 Al-1%Si 下面溅射一薄层 Ti 时即增强了膜与衬底的粘附力，也增强了 Al-Si 的抗电迁移能力。Al-Si-Cu 合金膜不仅具有 Al-Si, Al-Cu 合金膜各自的优点，而且由于两种溶质原子(Si 与 Cu)的相互作用，在晶界处形成稳定的化合物，相互抑制在晶界处的迁徙，因此 Al-Si-Cu 的抗电迁移能力优于 Al-Si 和 Ti/Al-Si。Al-Si/TiWTi/Al-Si 为多层复合结构，中间的 Ti/W/Ti 层作为上下两层金属层的阻挡层，也可抑制空洞的形成，明显增强了材料的抗电迁移能力，故在四种材料中抗电迁移能力最强。 n 值的大小反映了材料的抗电迁移能力，材料的抗电迁移能力越强，则在电流应力作用下，电阻增加得越慢，即 R_m 随 j 增加的速度越慢， n 值越小。

4.2 n 与温度的关系

从图 3 的结果可以看出，在 80~180℃的温度范围内 n 值基本相同，即在一定的温度范围内 n 值的大小与温度无关。但应注意到这个温度的大小与金属条电流应力的大小密切相关。即环境温度和一定电流下的焦尔热构成了金属条的实际温度，而 n 值的精确测量就必须消除焦尔热的影响，本实验正是考虑了这一点。有报道表明，当金属条的温度超过 350℃，电迁移失效机理已从晶界扩散变为晶格扩散，金属条要发生击穿，此时的 n 值已变到 7~8，所以作者认为在金属条温度低于 350℃时，上述规律是成立的。

4.3 n 与电流密度的关系

对一种材料，做不同电流斜坡下的实验结果和电流斜坡实验本身都表明，在一定的电流密度范围内， n 的大小与电流密度无关。但在电流密度较低时，例如对 Al-Si 样品，在 $j < 5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 时，图 4 中的数据点异常分散，未显示出任何电迁移与电流密度的本质关系，这是由于较低电流密度下电迁移尚未发生的缘故。而当电流密度增大到某一值时，如本实验中的 Al-Si 样品， $j > 4.0 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 时， n 因子从正常值突然增加到 7~8。这种现象可解释为电阻上升到一定值时电热正反馈使温度失控的结果，但温度失控应为一缓变过程(由计算机调节能力决定)。故认为 n 值的突变是所谓金属击穿现象造成更为妥当。此时的电流密度即是金属临界击穿电流密度。实际上，BEM 法正是通过测量金属击穿能来计算金属激活能的^[10]。

4.4 n 与占空比 D 的关系

如图 5 所示，随着 D 的增大 n 值增大。这可以从两方面进行解释：一是在低频脉冲条件下，存在着一种回扩散现象，叫作 On-time 模式，在脉冲应力导通时间(On time)内离子发生迁徙，而在应力关闭时间(Off-time)内由于浓度梯度及温度的作用，离子将产生回扩散，从而恢复部分损伤。随着占空比的增加，应力导通时间延长，样品条损伤加重，而恢复作用减小，电迁移发生速度加快， n 值升高。二是在脉冲应力下存在着浪涌作用，在脉冲施加的瞬间电子风会对离子产生冲击作用，从而加剧离子的迁徙。图 5 所示的 D 与 n 的关系，正是 On-time 模式和浪涌作用的综合结果。

4.5 n 与频率 f 的关系

如图 6 所示，在 $f < 10 \text{ Hz}$ 时， n 值基本不变，在 $10 \text{ Hz} < f < 100 \text{ Hz}$ 范围内 n 值随 f 增加

而减小,在 $f > 100\text{Hz}$ 时 n 值基本不变. 这点符合有关文献 [11] 金属条脉冲直流寿命与频率关系的报道. 根据过剩空穴浓度积累和释放响应时间理论, 在低频区, 即 $f \ll 1/\tau$ (τ 为空穴释放时间), 一个周期中的导通脉宽远大于 τ . 因此, 过剩空穴浓度能达到它在直流应力下的平衡值, 空洞形成速度较快, 电阻增加较快, n 值较大. 在高频区, $f > 1/\tau$ 时, 一个周期的导通宽度小于 τ . 因此, 过剩空穴浓度只能达到它在直流应力下平衡值的一部分, 空洞形成速率较慢, 电阻增加速率下降, n 值较小. 频率拐点为 $0.1/\tau$ 和 $1/\tau$. 对 Ti/Al-Si 样品在 150°C 的实验温度下, 频率拐点为 10Hz 和 100Hz . 由于 τ 是温度、材料和晶粒尺寸的函数^[12], 所以频率的拐点随实验温度、样品材料不同而变化.

4.6 焦耳热效应的影响

上述 n 值测量结果在大家公认的 n 值范围内, 但与某些文献的报道, 如文献[13]中 $n = 4.0 \sim 5.0$ 相差甚远. 研究发现, 一般方法中 n 测量值偏大的主要原因是焦耳热效应. 在较低电流密度范围, 焦耳热造成的金属条温升可以忽略, 故条温可近似用环境温度代替. 而在较高电流密度范围, 试验过程中的金属条温度远远高于环境温度, 焦耳热效应不能忽略. 本实验重点考虑了焦耳热影响, 通过计算机实时控制系统, 可使金属条温度波动控制在 $\pm 0.5^\circ\text{C}$.

5 结论

- (1) 电流密度因子主要由材料决定, 材料的抗电迁徙能力越强, n 值越小;
- (2) n 值大小与一定范围内的温度和一定范围内的电流密度无关;
- (3) n 值大小随脉冲信号占空比 D 的增加而增加;
- (4) 在 $f < 1/\tau$ 和 $f > 1/\tau$ 时 n 值与频率无关, 在 $0.1/\tau < f < 1/\tau$ 范围内, n 值随 f 增大而减小;
- (5) DCR 是快速精确测量 n 值的一种有效方法, 稍加修改可直接用于晶片级在线监测.

参 考 文 献

- [1] R. E. Hummel *et al.*, J. Phys. Chem. Solid., 1976, **37**: 73.
- [2] C. C. Hong and D. L. Crook, IEEE Proc. of IRPS', 1985, 108.
- [3] T. M. Chen *et al.*, IEEE Proc. of IRPS', 1985, 87.
- [4] J. R. Black, IEEE Proc., 1969, **57**(9): 1587.
- [5] I. A. Blech *et al.*, J. Appl. Phys., 1969, **40**: 485.
- [6] P. B. Ghate, IEEE Proc. of IRPS', 1982, 292.
- [7] V. M. Koleshko *et al.*, Thim Solid Films, 1990, **192**: 181.
- [8] F. Fisher and J. Fellinger, IEEE Proc. of IRPS', 1977, 260.
- [9] D. G. Pierce *et al.*, IEEE Proc. of IRPS', 1994, 198.
- [10] C. C. Hong and D. L. Crook, IEEE Proc. of IRPS', 1985, 180.
- [11] Jiang Tao *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, ED-41(8): 539.
- [12] J. S. Suehle and H. A. Schafft, IEEE Proc. of IRPS', 1989, 229.
- [13] Blair *et al.*, Appl. Phys. Lette., 1970, **17**: 281.

Electromigration Parameter —A Dynamic Current Ramp Measurement Method of Current Density Exponent

Li Zhiguo, Sun Yinghua, Deng Yan, Zhang Wei,
Cheng Yaohai, Guo Weiling and Zhang Wanrong

(*Department of Electronic Engineering, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022*)

Received 23 August 1996, revised manuscript received 8 April 1997

Abstract The current density exponent (n) and its accurate measurement technology in Black equation are studied. A dynamic current ramp method (DCR) is presented for the first time. Compared with the MTF method, it can improve the accuracy and test speed of n and eliminate effect of Joule heat in high current density. The n values of four samples have been measured under DC and pulse stress. The results show that the values of n depend on materials, frequency and duty ratio, but are independent of temperature and current density in some degree.

PACC: 6610, 0620; **EEACC:** 0170N