

金属互连电迁移噪声的多尺度熵复杂度分析*

何 亮^{1)†} 杜 磊¹⁾ 庄奕琪²⁾ 李伟华²⁾ 陈建平¹⁾

1) 西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

2) 西安电子科技大学微电子学院, 西安 710071)

(2007 年 12 月 26 日收到, 2008 年 2 月 14 日收到修改稿)

针对传统频域方法用于分析金属铝互连中的噪声信号的局限性, 本文采用多尺度熵方法分析电迁移噪声时间序列. 结果表明在电迁移早期, 噪声信号较不规律, 复杂度较大. 随空洞成核的发生, 噪声信号规律性增强, 复杂度明显减小, 反映出随电迁移过程的进行系统的混乱度不断减小. 通过与传统表征参量的对比, 证明多尺度熵能够对电迁移失效过程进行表征.

关键词: 电迁移, 噪声, 多尺度熵, 复杂度

PACC: 7270, 6630Q, 6550, 0545

1. 引 言

电迁移是指在金属材料中存在大电流的情况下, 金属原子出现宏观移动的现象, 其结果是在材料局部出现金属原子堆积或亏损, 形成小丘或空洞. 从物理意义上看, 电迁移现象和多晶金属薄膜内的各种扩散机理间有着密切的关系^[1]. 由于电迁移可导致铝互连线失效, 电迁移问题历来是微电子可靠性研究热点. 对芯片制造业而言, 在集成电路特征尺寸不断小型化的今天, 互连内部电流密度已达到 MA/cm² 量级, 电迁移引起的互连失效问题变得尤为突出^[2].

人们曾先后提出过多种电迁移现象的表征方法与参量. 电阻测量最早被 Rosenberg 和 Berenbaum^[3] 用来反映电迁移损伤, 阻值突变被公认为是发生空洞成核的标志^[4,5]. 1973 年, Vossen^[6] 提出将噪声用于金属薄膜中的缺陷检测. 随电迁移的进行, 不同噪声类型反映电迁移各阶段不同的损伤机理^[7]. 然而, 到目前为止, 几乎所有器件的噪声分析均建立在功率谱分析的基础上. 功率谱计算需要对信号整体经傅里叶变换到频域空间, 因此它不能反映噪声的局部奇异性, 也无法表述信号的时域性质, 如时间序列的规律性及复杂度, 故无法全面提取电迁移噪声信

号中所携带的信息.

针对上述问题, 近年来人们提出了各种新的信号分析方法, 以弥补以功率谱为基础的分析方法的不足. 多尺度熵方法是其中之一. 该方法首先是由 Costa 等人^[8] 为解决单一尺度下熵值增加与信号复杂度不成正比的矛盾而提出的, 可用于描述时间序列在不同时间尺度上的不规律程度. 本文将多尺度熵方法用于电迁移噪声数据分析. 结果表明: 电迁移早期, 噪声信号较不规律, 其复杂度较大, 电迁移空洞成核阶段, 噪声信号规律性增强, 其复杂度明显减小. 由信息熵与系统热力学熵的函数关系可知, 空洞成核后, 电迁移系统混乱度明显减小, 揭示出随电迁移的进行, 噪声产生机理由大量空位随机散射转变为类似于介观混沌腔的空洞散射. 因此, 多尺度熵能反映电迁移信号复杂度及电迁移系统混乱度的变化, 多尺度熵值的突变可用来表征空洞成核的发生.

2. 多尺度熵理论

多尺度熵定义为多重尺度下的样本熵值, 它最终得出粗粒化时间序列的样本熵值随尺度因子变化的图形^[9]. 多尺度熵算法如下: 给定一维离散时间序列 $\{x_1, \dots, x_i, \dots, x_L\}$, 通过定义尺度因子 τ , 建立粗粒化时间序列 $\{y^{(\tau)}\}$, 定义为

* 国家自然科学基金(批准号: 60376023)和西安应用材料创新基金(批准号: XA-AM-200603)资助的课题.

† E-mail: tukenan@tom.com

$$y_j^\tau = 1/\tau \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} x_i, \quad (1)$$

式中 $1 \leq j \leq L/\tau$. 这样, 每一个粗粒化时间序列的长度为 L/τ . 对于尺度 1 来说, 粗粒化的时间序列就是原时间序列. 接下来计算 τ 尺度下的样本熵. 令 $\{Y_i^\tau\} = \{y_1^\tau, \dots, y_i^\tau, \dots, y_N^\tau\}$ 为一长度为 N 的时间序列, 其中 $N = L/\tau$; $u_m^\tau(i) = \{y_i^\tau, y_{i+1}^\tau, \dots, y_{i+m-1}^\tau\}$, $1 \leq i \leq N - m$ 为一组长度为 m 的向量; 令 $n_{im}^\tau(r)$ 代表与向量 $u_m^\tau(i)$ 之间距离小于 r 的向量 $u_m^\tau(j)$ 的个数, 其中 $j = 1 - N - m$ 且 $j \neq i$; 令 $C_i^{\tau, m}(r) = n_{im}^\tau(r) / (N - m - 1)$ 为任一向量 $u_m^\tau(j)$ 与 $u_m^\tau(i)$ 之间的距离小于 r 概率. 由此令

$$U^{\tau, m}(r) = 1/(N - m) \sum_{i=1}^{N-m} \ln C_i^{\tau, m}(r), \quad (2)$$

样本熵定义为

$$SE_n(\tau, m, r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left\{ - \ln \frac{U^{\tau, m+1}(r)}{U^{\tau, m}(r)} \right\}. \quad (3)$$

当 N 为有限值时, 样本熵由如下统计结果给出:

$$SE_n(\tau, m, r, N) = - \ln \frac{U^{\tau, m+1}(r)}{U^{\tau, m}(r)}. \quad (4)$$

多尺度熵定义为样本熵值在多个尺度下的集合, 通过 τ 值变化重复上述各步骤, 多尺度熵为

$$MSE = \left\{ \tau \left| SE_n(\tau, m, r) = - \ln \frac{U^{\tau, m+1}(r)}{U^{\tau, m}(r)} \right. \right\}. \quad (5)$$

3. 电迁移加速寿命实验

实验样品为标准 4 端引出金属铝互连测试结构, 采用塑料双列直插封装, 由无锡微电子科研中心的 $1 \mu\text{m}$ 标准互补金属氧化物半导体 (CMOS) 工艺制造. 样品纵向剖面如图 1 所示.



图 1 测试样品纵向结构

加速寿命实验采用高温、大电流的恒定应力实验条件, 以便在较短时间内有控制地获得一定损伤程度的电迁移样品. 样品的具体尺寸及实验应力条件见表 1.

表 1 实验应力条件与样品尺寸

样品编号	加速温度/°C	加速电流密度/ $\text{MA} \cdot \text{cm}^{-2}$	测试温度/°C	样品尺寸(宽,长,厚)/ μm
g2	120	2.4	20	1.7, 1335, 0.5
p1	100	2.0	20	2.0, 1325, 0.5
p2	100	2.4	20	1.7, 1335, 0.5

实验中加速应力由 KEITHLEY 238 型恒流源及台式高温温控箱提供, 噪声测试系统由 SA-200F3 型低噪声前置放大器、EG&G PARC113 型低噪声前置放大器、HP3528A 型双通道频谱分析仪组成. 金属薄膜电阻的噪声测试系统的构成和连接如图 2 所示.

实验过程中, 每隔一固定时间段采集一次噪声时间序列, 用于多尺度熵复杂度分析. 同时, 我们采集了样品电阻值用于对多尺度熵结果进行比较分析, 从而进一步深入探讨电迁移内在失效机理.

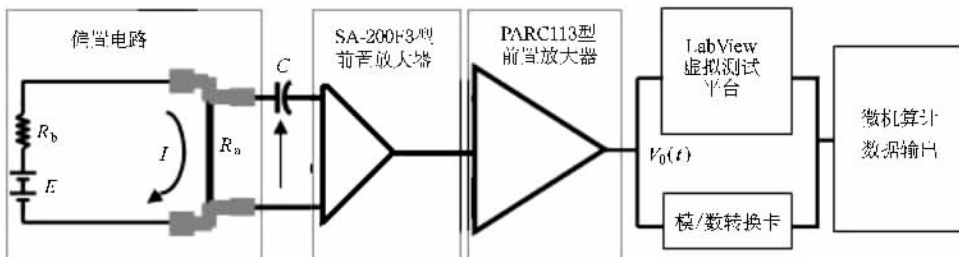


图 2 电迁移噪声测试系统

4. 实验结果与讨论

图 3 为电迁移样品的多尺度熵计算结果,图中每一条曲线分别对应于电迁移加速实验中的某一时间点 t . 结果显示,电迁移前期,熵值曲线相对较大,且熵值随尺度的增加趋于定值;电迁移后期($g_2, t \geq 20$ h; $p_1, t \geq 55$ h; $p_2, t \geq 57$ h),熵值曲线明显减小,且熵值随尺度的增大而增大,并不收敛.

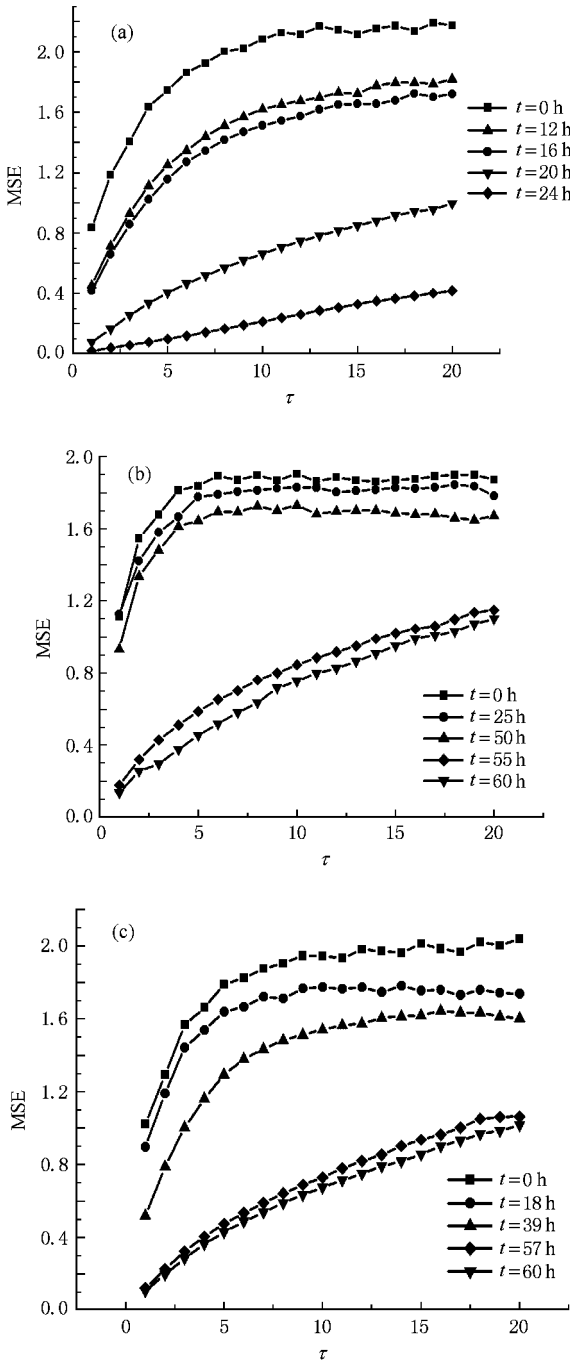


图 3 电迁移过程的多尺度熵曲线 (a)样品 g_2 (b)样品 p_1 (c)样品 p_2

由多尺度熵算法可以看出,多尺度熵值反映的是粗粒化时间序列的规律程度. Manuela 等^[10]亦指出,多尺度熵值反映了时间序列在不同尺度上的规律性,即时间序列中是否存在规律结构. 信号规律性的增加意味着复杂度的丧失^[10],故多尺度熵值反映了时间序列复杂度的大小^[9]. 图 3 中样品 g_2, p_1, p_2 分别在电迁移过程的某一时刻(20 h, 55 h, 57 h),其多尺度熵曲线幅度明显减小,且线型发生改变,由熵值随尺度增加趋于定值变为熵值随尺度增加而增大,并不产生收敛,说明在这些时刻,由于噪声信号变得更加规律,导致信号复杂度减小,进而揭示出噪声产生机理发生了改变.

按噪声产生机理的不同,铝互连电迁移过程一般分为空位扩散、空位聚集、空洞成核及长大等阶段. 电阻是最常采用的一种电迁移表征参量,阻值的突变标志着空洞成核的发生,此时电迁移损伤发展到不可逆转的阶段,将很快发生断条^[11]. 图 4 为电迁移样品电阻随加速时间的变化图,从图中可以看出,样品 g_2, p_1, p_2 分别于第 20 h, 55 h, 57 h 时电阻突变,发生空洞成核,随后很快断条. 可见在电迁移空洞成核时刻,多尺度熵值急剧减小,同时产生发散. 多尺度熵值反映了电迁移过程中噪声产生机理的改变,能够作为空洞成核发生的标志.

金属薄膜电迁移平均寿命 MTF 通常可用 Black 经验公式表示为^[12]

$$MTF = \frac{A \exp(E_A/kT)}{j^n}, \quad (6)$$

式中 A 为材料固有常数, j 为电流密度, n 为电流密度系数,其取值大致等于 2, k 为玻尔兹曼常数, T 是金属薄膜的绝对温度, E_A 为电迁移激活能. 在激活能不变的前提下,加速电迁移的电流密度与温度均

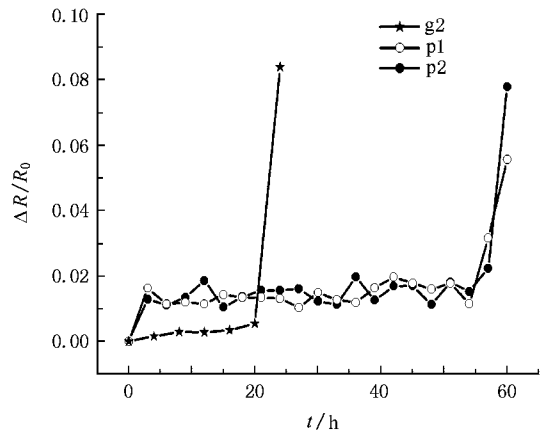


图 4 电阻随加速寿命时间变化图

与样品寿命成反比. 本实验中样品 g_2 与 p_2 的尺寸与加速电流密度完全相同, 仅加速温度有所不同, 两样品的空洞成核时间却相差数倍. 可见温度对于电迁移的影响非常显著, 是决定电迁移程度的主要因素之一^[13].

为证明多尺度熵结果的正确性, 将本文结果与文献结果进行对比. Costa 等^[9]将多尺度熵用于生物信号分析并指出: 健康个体心脏信号的多尺度熵值较大, 且熵值随尺度的增加趋于定值, 反映出此时信号复杂度较大; 当噪声产生机理发生改变(如病变发生)时, 噪声信号熵值明显减少, 且随尺度增加不收敛, 复杂度减小(见图 5). 图中 Young 为健康青年的心脏信号分析结果, CHF 为充血性心衰的分析结果. 图 5 结果中多尺度熵曲线趋势与图 3 结果相一致.

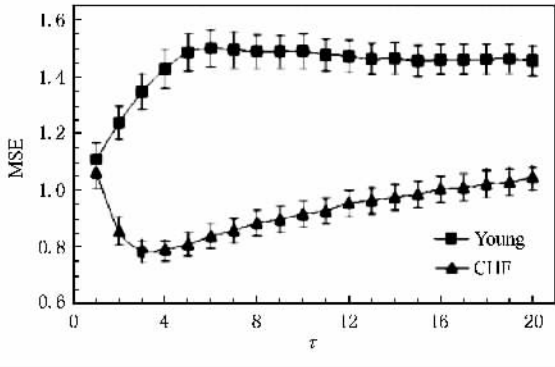


图 5 多尺度熵用于生物心脏信号分析结果^[9]

多尺度熵值描述电迁移噪声信号时间序列的复

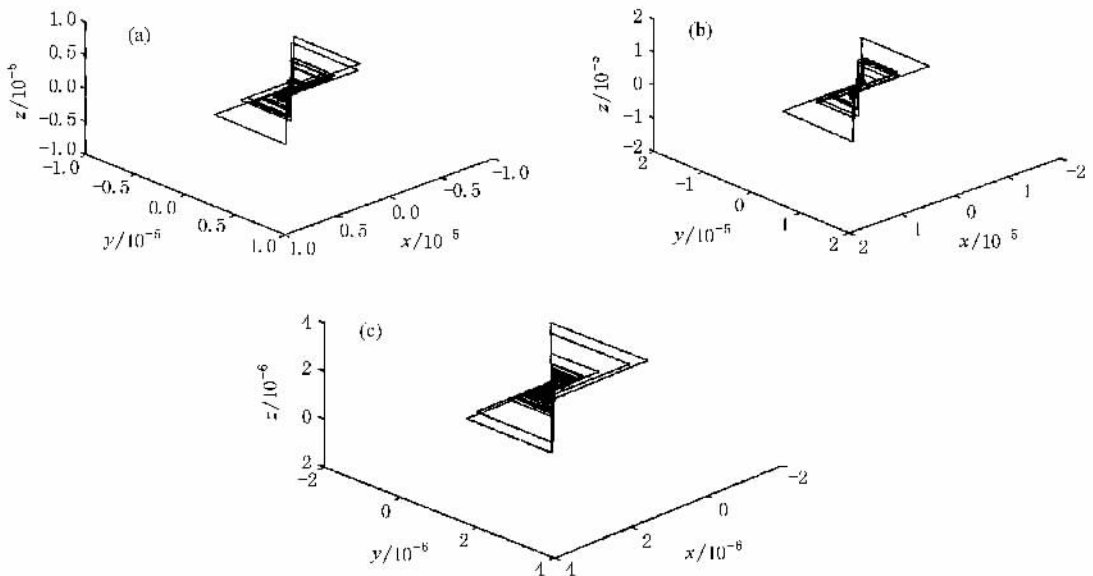


图 6 空洞成核后噪声信号相图 (a) 样品 g_2 ($t = 24$ h) (b) 样品 p_1 ($t = 60$ h) (c) 样品 p_2 ($t = 60$ h)

杂度, 而热力学熵能够直接反映系统宏观态内部包含微观状态数的多少, 即系统的“混乱度”. 由于信号熵与热力学熵存在一定关系, 可用噪声时间序列的多尺度熵表征产生电迁移的金属物理系统混乱度的变化. 在各微观状态相互独立且等概率的假设下, 系统信号熵与热力学熵有如下关系^[13]:

$$\frac{S}{H} = k \ln 2, \quad (7)$$

式中 S 为系统的热力学熵, H 为信号熵, 这里即为多尺度熵 MSE, k 为玻尔兹曼常数. 可见系统的热力学熵与多尺度熵成正比关系. 随电迁移过程的进行, 噪声信号的多尺度熵减少, 系统热力学熵亦减少, 表明系统混乱度以及微观状态数随电迁移过程的进行而减少.

为深入探讨多尺度熵结果所反映出的电迁移系统混乱度变化的原因, 须从金属薄膜互连电迁移内在损伤机理入手. 电迁移前期, 在“电子风”的作用下, 金属原子发生迁移, 原子移走处即产生空位, 由空位扩散的 Laplace 方程可知空位浓度随时间线性增加, 表示如下^[21]:

$$C_v = C_0(v^2/D)t, \quad (8)$$

式中 C_v 是晶界处空位浓度, C_0 为远离晶界处的空位浓度, v 为迁移流速率, D 为沿晶界的空位扩散率. 由于大量空位随机分布, 且空位对载流子的散射是随机的, 导致系统中微观状态数众多, 系统混乱度较大. 电迁移后期, 由大量空位聚集形成空洞, 空洞已具有介观尺度, 其尺寸与形貌均与介观混沌腔类似, 载流子在其中受到的散射具有典型的混沌特

性^[14].将样品空洞成核后的噪声信号在三维空间中重构^[14],并做出相图(见图6).由图6可以看出,此时噪声信号在相空间中围绕一固定吸引子具有无穷嵌套的结构,具有明显的规律性,其轨迹为典型的混沌图形,说明此时的电迁移噪声具有确定性动力学产生机理,从而导致系统中微观状态数减少,混乱度相应减少.

5. 结 论

本文采用多尺度熵方法对金属互连电迁移噪声

时间序列进行分析.结果表明,电迁移早期,噪声信号较不规律,其复杂度较大;电迁移空洞成核阶段,噪声信号规律性增强,复杂度明显减小.这一结果可由电迁移散射理论予以解释,电迁移前期空位扩散和聚集,大量空位散射产生复杂的电迁移噪声信号;随空洞成核,空位减少,空洞散射类似介观混沌腔散射.虽然与电阻突变一样,多尺度熵的变化也能反映出空洞成核的发生,但是多尺度熵方法更为灵敏,而且通过噪声信号的多尺度熵与热力学熵的关系,可以用本方法表征电迁移过程中材料的热力学特性.

- [1] Zhang W J , Yi W B , Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5424 (in Chinese) [张文杰、易万兵、吴 瑾 2006 物理学报 **55** 5424]
- [2] Zong Z X , Du L , Zhuang Y Q , He L , Wu Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5872 (in Chinese) [宗兆翔、杜 磊、庄奕琪、何 亮、吴勇 2005 物理学报 **54** 5872]
- [3] Rosenberg R , Berenbaum L 1968 *Appl. Phys. Lett.* **12** 201
- [4] Pierce D G , Brusius P G 1997 *Microelectron. Reliab.* **37** 1053
- [5] Shingubara S , Kaneko H , Saitoh M 1991 *J. Appl. Phys.* **69** 207
- [6] Vossen J L 1973 *Appl. Phys. Lett.* **23** 287
- [7] Du L , Zhuang Y Q , Xue L J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2836 (in Chinese) [杜 磊、庄奕琪、薛丽君 2002 物理学报 **51** 2836]
- [8] Costa M , Goldberger A L , Peng C K 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 068192
- [9] Costa M , Goldberger A L , Peng C K 2005 *Phys. Rev. E* **71** 021906

- [10] Manuela F , Maria G S , Giovanni M , Sergio C 2006 *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* **53** 119
- [11] Doan J C , Bravman J C , Flinn P A , Marieb T N 2000 *Microelectron. Reliab.* **40** 981
- [12] Black J R 1967 *Proceeding of the 6th Annual Reliability Physics Symposium* 148
- [13] Li C Z , Huang M Q , Chen P X , Liang L M 2000 *Quantum Communication and Calculation* (Changsha : National University of Defense Technology Press) (in Chinese) [李承祖、黄明球、陈平形、梁林梅 2000 量子通信和量子计算(长沙:国防科技大学出版社)]
- [14] He L , Du L , Zhuang Y Q , Chen C X , Wei T , Huang X J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7176 (in Chinese) [何 亮、杜 磊、庄奕琪、陈春霞、卫 涛、黄小君 2007 物理学报 **56** 7176]

Multiscale entropy complexity analysis of metallic interconnection electromigration noise^{*}

He Liang^{1)†} Du Lei¹⁾ Zhuang Yi-Qi²⁾ Li Wei-Hua²⁾ Chen Jian-Ping¹⁾

¹⁾ *School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China*

²⁾ *School of Microelectronics, Xidian University, Xi'an 710071, China*

(Received 26 December 2007; revised manuscript received 14 February 2008)

Abstract

In order to solve the limitation of traditional frequency-domain analysis in Al interconnection electromigration noise, the multiscale entropy (MSE) method is proposed to analyze the electromigration noise time series. The result shows that at the early stage, electromigration noise is irregular, the noise complexity is large, and with the occurrence of nucleation, the electromigration noise becomes more regular, and the complexity decreases obviously. It indicates that the disorder degree of electromigration system decreases continually. Compared with traditional parameters, MSE can be used to successfully characterize electromigration process.

Keywords : electromigration, noise, MSE, complexity

PACC : 7270, 6630Q, 6550, 0545

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60376023) and the Innovative Foundation of Xi'an Applied Materials Inc., China (Grant No. XA-AM-200603).

[†] E-mail : tukenan@tom.com