

# 金属互连电迁移噪声的相关维数研究<sup>\*</sup>

何 亮<sup>1)</sup> 杜 磊<sup>1)</sup> 庄奕琪<sup>2)</sup> 陈春霞<sup>1)</sup> 卫 涛<sup>1)</sup> 黄小君<sup>1)</sup>

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 2 月 8 日收到, 2007 年 5 月 31 日收到修改稿)

针对金属铝互连中噪声信号随电迁移过程变化规律及其所反映的内部失效机理问题, 提出将相关维数用于对电迁移噪声时间序列的分析. 通过对互连电迁移噪声实验数据的相关维数计算, 发现随着电迁移的进行, 金属铝互连噪声由随机性成分占主导变为确定性成分占主导, 反映出噪声由随机信号转变为混沌动力学信号. 应用散射理论解释上述现象, 在金属互连电迁移中, 空位扩散阶段噪声主要产生机制是空位随机散射, 在空位聚集到空洞成核这一过程中, 噪声产生机制逐渐从随机散射转变到弹道混沌腔输运机制为主. 通过与传统表征参量的对比, 证明相关维数可用于预测金属互连的电迁移失效.

关键词: 电迁移, 噪声, 相关维数, 混沌

PACC: 6630Q, 7360D, 0540, 0545

## 1. 引 言

电迁移现象是金属互连中的原子受到运动电子作用而引起的物质输运现象. 它首先表现为电阻值的线性增加, 到一定程度后就会引起金属膜局部亏损而出现空洞或引起金属膜局部堆积而出现小丘或晶须, 最终导致突变失效, 严重影响集成电路的寿命.

1968 年, Rosenberg 和 Berenbaum<sup>[1]</sup>首次提出通过电阻测量研究电迁移过程. 这种方法直观明了, 电阻很快成为常用的表征金属互连电迁移损伤的标准参量, 但是要想得到显著的电阻变化, 需要较长的应力作用时间和较强的应力, 而且测试条件较为苛刻, 实验对样品具有不可逆的破坏性. 随后, Vossen<sup>[2]</sup>将噪声测量用于金属薄膜中的缺陷检测, Celasce<sup>[3]</sup>提出可通过噪声测量来研究电迁移. 近年来,  $1/f$  噪声已成为研究金属互连电迁移可靠性的一种主要手段.  $1/f$  噪声比电阻能更准确、更灵敏地反映电迁移状况. 在传统的噪声分析中, 人们通常假设噪声的产生过程是高斯型的平稳过程<sup>[4]</sup>, 然而, 电迁移过程是一种复杂的动态失效过程, 它的噪声信号表现出一定的非高斯型和非平稳性, 传统的傅里叶变换只适用于平稳信号, 无法全面反映电迁移信号中所携

带的信息<sup>[5]</sup>. 另外, 由于  $1/f$  噪声频谱是对信号的整体变换, 仅能反映出噪声信号的频域全局特性, 却无法表述信号的时域性质, 而这种性质恰恰是非平稳信号最根本和最关键的性质<sup>[6]</sup>. 基于以上原因, 本文将时间序列分析方法中的相关维数引入电迁移噪声实验数据分析. 结果表明, 随着电迁移的进行, 噪声信号性质发生变化, 由随机性成分占主导变为确定性成分占主导, 反映出电迁移噪声信号由随机信号转变为混沌信号. 通过对噪声信号产生的物理机制分析, 可以推断各阶段噪声信号产生机制是不同的. 相关维数能够反映出电迁移从空位扩散、聚集到空洞成核的各过程之间的变化.

## 2. 相关维数理论

相关积分法由 Grassberger 和 Procaccia<sup>[7]</sup>提出. 这一方法是研究非线性动力学的基本工具, 最早用于计算奇怪吸引子的分形维数.

相关积分的定义如下<sup>[7]</sup>: 设有时间序列为  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , 其中  $x_i \in R$ , 测量时间  $t_i = t_0 + \Delta t$ , 通过时间延迟, 定义一个维数为  $m$  的嵌入空间的矢量

$$\mathbf{v}_i = (x_i, x_{i+T}, x_{i+2T}, \dots, x_{i+(m-1)T}) \quad (1)$$
$$\mathbf{v}_i \in R^m,$$

则相关积分可表示为

$$C_N(r) = \frac{2}{N^2} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^{N-n} H(r - |v_{i+n} - v_i|), \quad (2)$$

其中  $r$  是嵌入空间的长度,  $H$  是 Heaviside 函数,

$$H(t) = \begin{cases} 1 & (t \geq 0), \\ 0 & (t < 0). \end{cases}$$

不难看出, 相关积分是在嵌入空间统计所有相互之间距离小于  $r$  的点的个数. 在一定区域内, 相关积分  $\alpha(r)$  和  $r$  有如下幂函数关系:

$$\alpha(r) \propto r^{\nu(m)}.$$

幂指数  $\nu(m)$  可以通过  $\log \alpha(r)$  对  $\log r$  的直线斜率计算, 即为相关维数  $D^{[7]}$ .

基于以上理论, Theiler 等<sup>[8]</sup>将相关维数应用于随机信号, 用其区分确定性系统产生的混沌动力学信号和随机系统产生的随机信号. 幂指数  $\nu(m)$  随  $m$  趋于稳定值的信号是动力学机制产生的混沌信

号. 幂指数  $\nu(m)$  随  $m$  变化而不收敛的信号是随机信号. 同时, 相关维数还可对混沌信号奇怪吸引子的几何特征进行定量表征, 用来确定描述动力系统所需要的变量个数或自由度<sup>[9]</sup>. 所以, 它可用于重构相空间, 对电迁移建模过程中所需变量个数进行估计.

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, 由信息产业部电子 58 所的  $1\text{ }\mu\text{m}$  标准互补金属氧化物半导体工艺制造. 采用了高温、大电流的恒定应力加速寿命实验方法, 以便在较短的时间内有控制地获得一定损伤程度的电迁移样品. 实验采用的应力条件和样品的具体尺寸见表 1.

表 1 实验采用的应力条件和样品尺寸

| 样品编号 | 加速温度/℃ | 加速电流<br>密度/ $\text{MA} \cdot \text{cm}^{-2}$ | 测试温度/℃ | 样品尺寸<br>(宽, 长, 厚)/ $\mu\text{m}$ |
|------|--------|----------------------------------------------|--------|----------------------------------|
| g    | 120    | 2.0                                          | 20     | 2.0, 1325, 0.5                   |
| w    | 120    | 2.4                                          | 20     | 1.7, 1335, 0.5                   |
| p    | 120    | 2.0                                          | 20     | 2.0, 1335, 0.5                   |

实验由加速电迁移与噪声测量两部分组成. 加速应力由 KEITHLEY 238 型恒流源及台式烘箱提供. 噪声测量系统由 SA-200F3 型低噪声前置放大器、PARC113 型低噪声前置放大器及 HP3528A 型双通

道频谱分析仪组成. 实验中每间隔一预定时间段进行一次测试. 金属薄膜电阻的噪声测试系统的构成和连接如图 1 所示.

在实验过程中, 我们分别采集了样品的电阻、噪

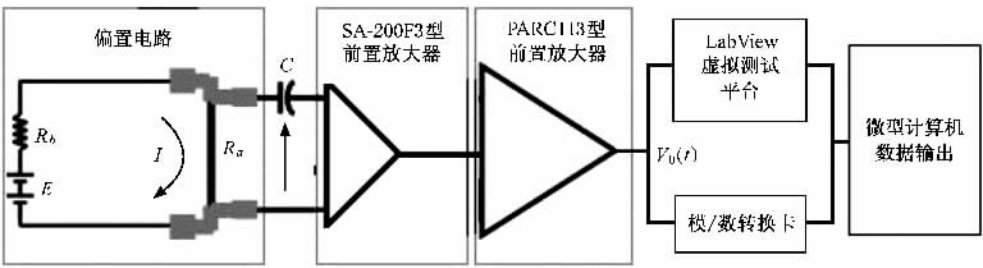


图 1 电迁移噪声测试系统示意图

声功率谱及噪声时间序列. 时间序列用于代入相关积分算法进行分析, 将得到的结果与电迁移传统表征参量电阻及噪声功率谱进行比较分析, 从而验证了相关维数表征参量的有效性, 并对电迁移内部失效机理进行了深入的分析.

4. 实验结果及讨论

在加速电迁移实验中, 样品 w 在实验进行 54 h

时电阻发生急剧变化, 随之很快断条. 图 2 给出样品 w 电阻突变前的相关积分分析结果. 图 2(a) 为加速电迁移实验进行 3 h 时信号的相关积分, 曲线前端线性区直线的斜率随嵌入维数的增大而不断增大, 即  $\nu(m)$  随  $m$  的增大而没有趋于饱和, 反映了此时的噪声信号中随机性成分占主导地位. 在电迁移前期, 金属互连内部缺陷主要以空位的形式出现. 在“电子风”的作用下, 金属原子定向移动可以用空位扩散来描述<sup>[10]</sup>. 由空位扩散的 Laplace 方程可得此

阶段空位浓度随时间变化的关系式如下：

$$C_v = C_0(v^2/D)t, \tag{3}$$

其中  $C_v$  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. 可见此阶段晶界处空位浓度随时间呈线性增加.

在互连导体中, 电流产生自电子在电场作用下的定向漂移运动, 在此运动过程中电子不断受到空位的散射作用. 随机散射可以用材料迁移率描述<sup>[11]</sup>. 电流密度与电子迁移率  $\mu$  的关系为

$$J = nq\mu |E|, \tag{4}$$

其中  $n$  为电子浓度,  $E$  为电场强度. 金属薄膜中电流噪声功率谱密度可以用胡格公式<sup>[11]</sup>表示为

$$S_I(f) = \frac{\alpha_H}{fN} I^2, \tag{5}$$

其中  $S_I$  为噪声电流功率谱密度,  $\alpha_H$  为胡格系数,  $N$  为载流子总数. 令互连截面积为  $S_0$ , 将(4)式代入(5)式, 得

$$\begin{aligned} S_I(f) &= \frac{\alpha_H}{fN} (JS_0)^2 \\ &= \frac{\alpha_H}{fN} (nq\mu |E| S_0)^2. \end{aligned} \tag{6}$$

由此可见, 电流噪声与材料迁移率成正比.

电子输运过程中空位对电子的散射概率与空位浓度成正比关系, 即

$$P \propto C_v T^{-3/2}, \tag{7}$$

其中  $T$  为样品温度. 可见在电迁移前期, 互连中空位浓度不断增加, 电子被散射的概率越来越大, 电子

的平均自由渡越时间越来越短. 散射概率与迁移率有如下关系：

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{q\tau}{m^*} \\ &= \frac{q}{Pm^*}, \end{aligned} \tag{8}$$

其中  $\tau$  为电子平均自由渡越时间,  $P$  为电子散射概率,  $m^*$  为电子的有效质量. 由此可见, 迁移率是由散射概率决定, 而电迁移前期的电流噪声是由大量空位随机散射过程产生.

图 2(b) 为加速电迁移实验进行 24 h 的噪声数据分析结果. 图中  $\chi(m)$  随  $m$  的增大不再发散, 而是呈现出一定的收敛趋势. 由相关积分理论可知, 此时信号中的确定性成分增加. 通过对比分析可以发现, 此时的噪声信号仍为  $1/f$  噪声, 与之前信号的时间序列及电压功率谱  $S_V$  没有明显的变化(图 3), 但相关积分曲线差异表明此时噪声的成分发生了变化. 反映到电迁移内部物理机制表明, 此时的空位浓度已达饱和, 空位逐渐在晶界处聚集, 形成了较大的空位集团. 随空位浓度的减少, 粒子被散射的微观状态数与混乱度也相应减少, 相应的噪声信号中随机性成分开始减少. 文献[13]将电迁移过程分为空位聚集、空洞成核及空洞长大三个阶段, 确定性成分增加这一现象说明空位浓度已达到饱和, 并发生空位聚集. 确定性成分出现的时间点可作为空位浓度增长至过饱和而将发生空位聚集的临界点.

图 4 为电迁移后期加速实验进行 54 h 的相关

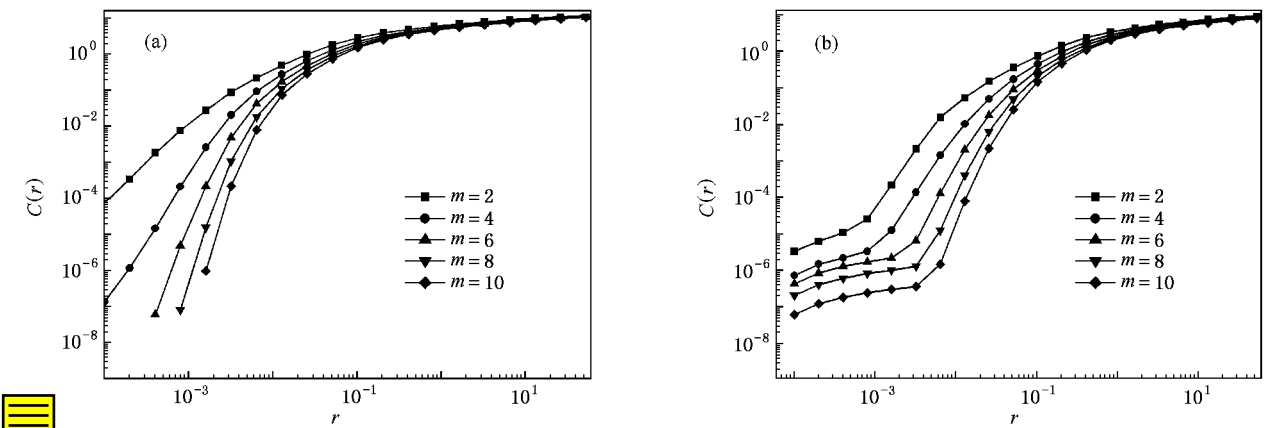


图 2 样品 w 电阻突变前相关积分分析结果 (a) 加速电迁移实验进行 3 h (b) 加速电迁移实验进行 24 h

分析结果, 此时电阻开始增加并在实验进行 57 h 左右发生断条. 与图 2(b) 相比较可知,  $\chi(m)$  随  $m$  的增大更加趋于收敛, 当  $m$  足够大时,  $\chi(m)$  收敛于一个

极限值. 这反映了电迁移噪声信号中的主要成分已由随机性成分转变为确定性成分. 随着电迁移的进行, 空位不断在晶界处聚集, 当空位浓度达到饱和后

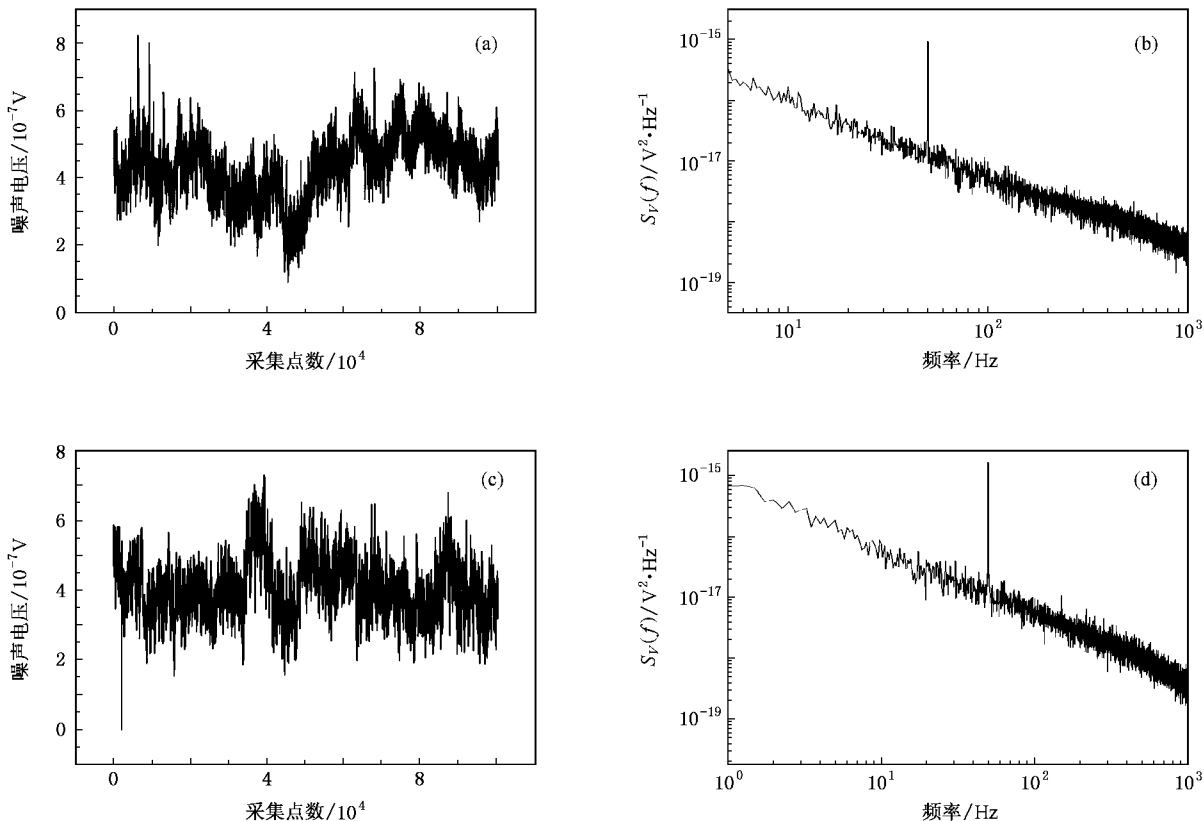


图3 电阻突变前的噪声时间序列与功率谱 (a)加速电迁移实验进行3 h的噪声时间序列 (b)加速电迁移实验进行3 h的噪声功率谱 (c)加速电迁移实验进行24 h的噪声时间序列 (d)加速电迁移实验进行24 h的噪声功率谱

会发生空洞成核.一旦一个空洞成核,会迅速长大直至发生断路.空洞成核后的电迁移将难以控制. Doan等<sup>[14]</sup>研究证明,在由空位聚集转变为空洞成核的时刻,电阻会发生突变.图5为本文实验得到的电阻测试结果与文献[14]的电阻测试结果对比,可以推断,本实验中54 h左右的样品电阻突变对应着空洞成核的时刻.图4的结果表明,在成核时刻噪声性质也发生了突变,噪声的主要产生机制由成核前的空位散射变为空洞散射.

由于空洞成核存在相互竞争,一般认为在一定区域内只有一个空洞成核发生.根据自由体积模型,空洞半径可表示为<sup>[14]</sup>

$$\lambda_f = \left( \frac{3V\{1 - \exp[-(Bt)^m]\}}{4\pi} \right)^{1/3}, \quad (9)$$

其中  $V$  为系统的总体积,  $B$  为与成核动力学机制有关的材料系数,  $m$  为常数.相应的空洞体积为

$$V_{\text{void}} = V\{1 - \exp[-(Bt)^m]\}. \quad (10)$$

空洞在形成时已可达微米量级<sup>[14]</sup>.若将空洞成核后的金属互连电流输运与介观导体开放混沌腔输运进行比较,金属互连空位成核形成的空洞尺度与介观

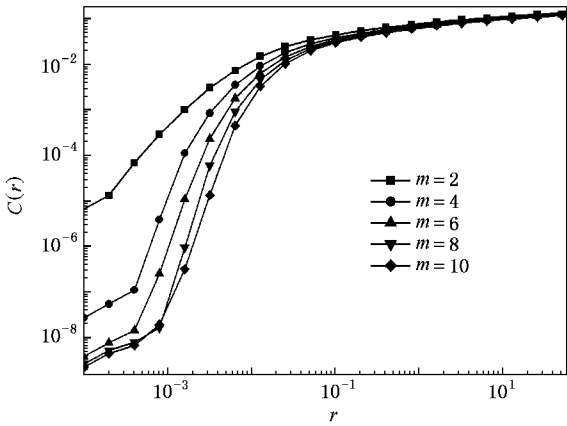


图4 加速电迁移实验进行54 h的相关分析结果

导体的混沌腔的尺度为同一数量级.图6为开放型混沌腔的示意图,其中  $N_L$  与  $N_R$  分别代表腔体与外界间的通路.文献[15]指出,形状不规则的开放介观腔体,电子输运具有典型的混沌特性.而金属互连电迁移形成的空洞正是具有不规则形貌的腔体<sup>[16]</sup>,如图7所示.由图7可见,空洞成核发生以后,相对于

大量空位的无规则散射,由大量空位聚集形成的空洞已具有介观尺度,电子进入混沌腔受到的散射具有确定性,即产生的噪声信号是确定性机制产生的.大量空位聚集成空洞,空位数量急剧减少,离散空位的随机散射减弱,混沌腔产生的噪声占据电流噪声主导地位,也使得检测得到的电噪声中确定性成分处于主导地位.

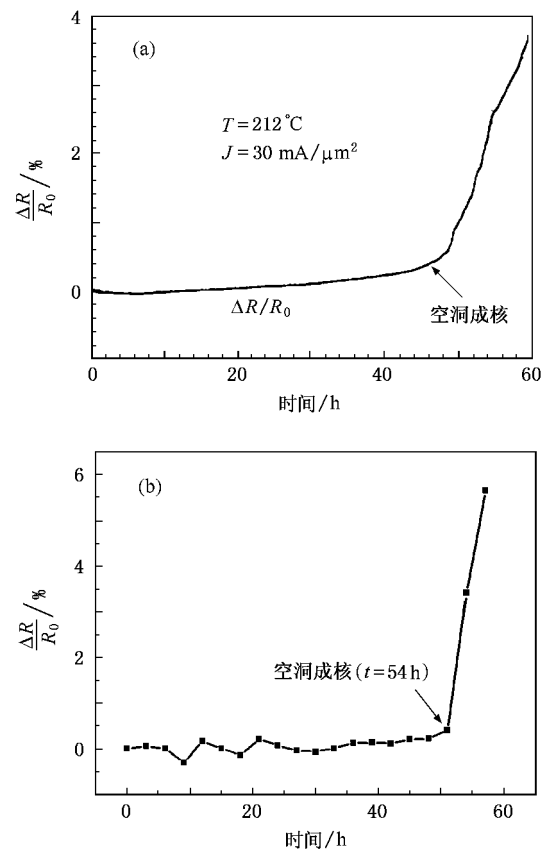


图5 电迁移过程中的电阻突变 (a)文献[14]的实验结果,(b)本文的实验结果

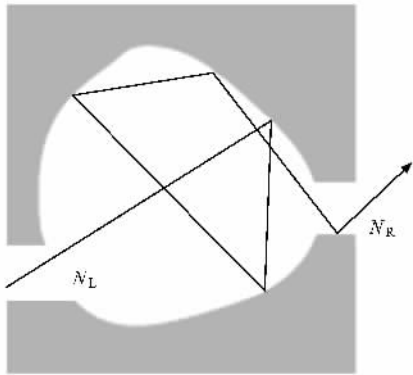


图6 开放型混沌腔示意图(引自文献[15])

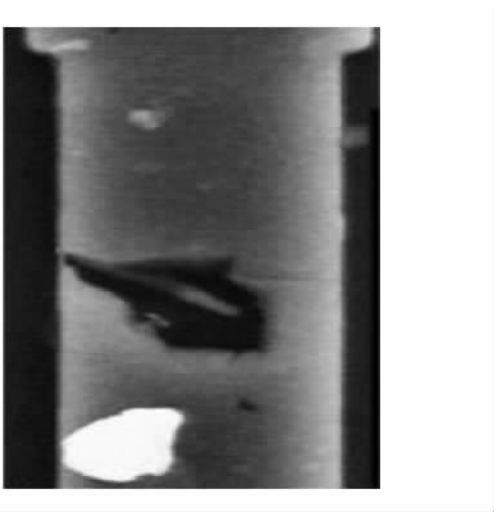


图7 空洞的扫描电子显微镜像(引自文献[16])

生标志着空洞成核的发生,预示了断条即将到来.由于样品宽度、长度的不同及不可避免的工艺误差,实验中样品g的断条时间为28 h,样品p的断条时间为81 h,它们的噪声时间序列的相关维数结果都显示了断条前若干小时混沌的产生.

图8为电迁移实验噪声频率指数 $\gamma$ 与文献[17]中1#—4#样品测量结果的对比.从图8可以发现,电迁移后期 $\gamma$ 值会发生跳变,此时噪声主要成分由 $1/f$ 变为 $1/f^{1.17}$ ,表明电迁移内部损伤加剧到一定程度,发生了量变到质变的转变,即空洞成核.样品w的 $\gamma$ 值在54 h左右跳变,这与相关维数的分析结果相一致,样品w在57 h发生断条,可见相关维数的变化能够对电迁移失效进行预测.

由非线性过程产生的混沌在相空间表现为一种奇怪吸引子,它具有不规则、非周期、自相似的结构特征.文献[18]证明根据一个变量的时间序列可以重构动力系统的相空间,对它的直观性解释就是因为时间序列本身蕴涵了参与此动力系统的全部变量的有关信息.电迁移加速寿命实验中,三个样品的相关维数在空洞成核后分别收敛于某一定值,如表2所列.由表2可知,重构电迁移动力系统的空间维数最少为三维.图9为样品空洞成核后混沌信号的相图.从图9可以发现,电迁移后期噪声信号具有无穷嵌套的自相似结构,其轨迹已类似于周期信号,说明确定性动力学机制发挥主要作用,与上述讨论的结果一致.

表2 三个样品成核后的相关维数

| 样品编号 | g      | w      | p      |
|------|--------|--------|--------|
| 相关维数 | 2.3235 | 2.1400 | 2.1508 |

通过与电阻突变时间的比较,可以发现混沌产

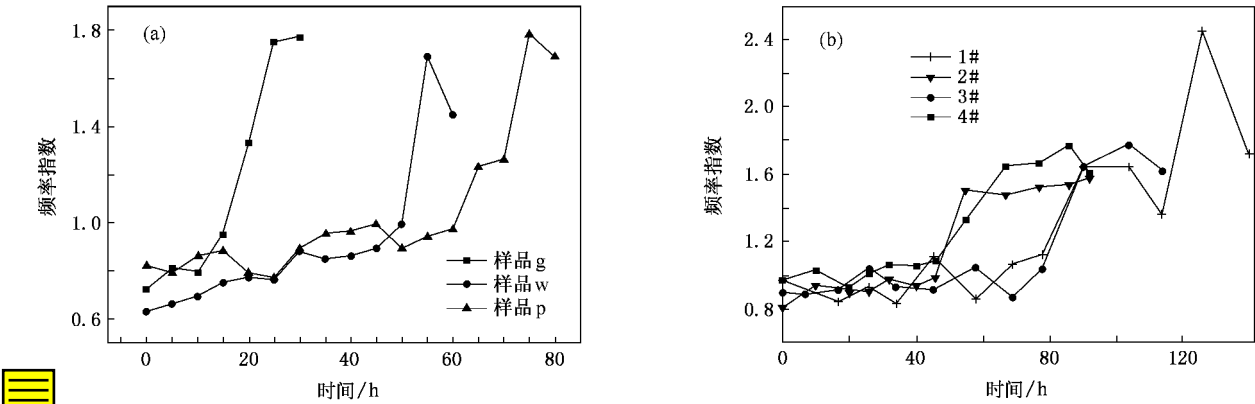


图 8 功率谱指数随加速寿命时间的变化 (a)本文的实验结果 (b)文献 [17] 的结果

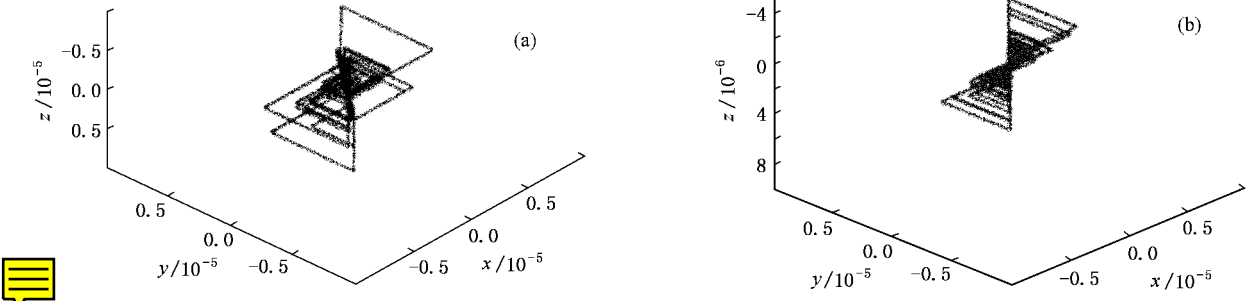


图 9 电迁移噪声混沌信号的三维相图 (a)样品 g (b)样品 w

5. 结 论

本文利用时间序列分析方法中相关积分方法研究金属互连电迁移噪声信号.发现随着电迁移的进行,金属铝互连噪声由随机性成分占主导变为确定性成分占主导,反映出噪声由随机信号转变为混沌动力学信号.应用散射理论解释上述现象,在金属互

连电迁移空位扩散阶段噪声主要产生机制是空位随机散射.在空位聚集到空洞成核这一过程中,噪声产生机制逐渐从随机散射转变到弹道混沌腔输运为主.与传统的功率谱表征参量对比后发现,相关维数能够对电迁移失效进行预测.通过相空间重构得到样品空洞混沌散射动力学维数在 2—3 之间.本文的工作为下一步理论模型的建立提供了条件.

[ 1 ] Rosenberg R , Berenbaum L 1968 *Appl. Phys. Lett.* **12** 201

[ 2 ] Vossen J L 1973 *Appl. Phys. Lett.* **23** 287

[ 3 ] Celasce M 1976 *Phys. Rev. Lett.* **36** 38

[ 4 ] Simoen E , Claeys C 1999 *Semicond. Sci. Technol.* **14** R61

[ 5 ] Feng S , Lee P A , Store A D 1986 *Phys. Rev. Lett.* **56** 1960

[ 6 ] Zhang X D , Bao Z 1999 *Non-stationary Signal Analysis and Processing* ( Beijing : National Defense Industry Press )( in Chinese )

[ 张贤达、保 铮 1999 非平稳信号分析与处理(北京:国防工业出版社)]

[ 7 ] Grassberger P , Procaccia I 1983 *Phys. Rev. Lett.* **31** 346

[ 8 ] Theiler J 1986 *Phys. Rev. A* **34** 2427

[ 9 ] Liu B Z , Peng J H 2004 *Nonlinear Dynamics* ( Beijing : Higher Education Press )( in Chinese )[ 刘秉正、彭建华 2004 非线性动力学(北京:高等教育出版社)]

[ 10 ] Kao H K , Cargill G S , Giuliani F , Hu C K 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 2516

[ 11 ] Zhuang Y Q , Sun Q 1993 *Noise and Its Minimizing Technology in Semiconductor Devices* ( Beijing : National Defense Industry Press )( in Chinese )[ 庄奕琪、孙 青 1993 半导体器件中的噪声及其低噪声化技术(北京:国防工业出版社)]

[ 12 ] Liu E K , Zhu B S , Luo J S , Kang R M , Tu S J 1997 *Semiconductor Physics* ( Beijing : National Defence Industry Press )( in Chinese )

- [ 刘恩科、朱秉升、罗晋生、亢润民、屠善洁 1997 半导体物理学 ( 北京 : 国防工业出版社 ) ] p23
- [ 13 ] 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 ] [ 16 ] Buerke A , Wendrock H , Wetzig K 2000 *Cryst. Res. Technol.* **35** 721
- [ 14 ] Doan J C , Bravman J C , Flinn P A , Marieb T N 2000 *Microelectron. Reliab.* **40** 981 [ 17 ] 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 ]
- [ 15 ] Mikhail L P 2005 *Ph. D. Dissertation* ( Ithaca : Cornell University ) [ 18 ] Wang X Y 2003 *Chaos in the Complex Nonlinearity System* ( Beijing : Electronic Industry Press ) ( in Chinese ) [ 王兴元 2003 复杂非线性系统中的混沌 ( 北京 : 电子工业出版社 ) ]

## Research on noise correlation dimension of metallic interconnection electromigration<sup>\*</sup>

He Liang<sup>1)</sup> Du Lei<sup>1)</sup> Zhuang Yi-Qi<sup>2)</sup> Chen Chun-Xia<sup>1)</sup> Wei Tao<sup>1)</sup> Huang Xiao-Jun<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> *School of Technical Physics , Xidian University , Xi'an 710071 , China* )

<sup>2)</sup> *School of Microelectronics , Xidian University , Xi'an 710071 , China* )

( Received 8 February 2007 ; revised manuscript received 31 May 2007 )

### Abstract

In order to describe the change of noise signal in Al thin-film during electromigration process and its invalidation mechanism , correlation dimension was used in the electromigration noise signal analysis. Through calculating correlation dimension of electromigration noise signals attained by our experiment , the result showed that the main component of noise signal changed from stochastic to determinate during electromigration process , indicating that the noise changed from stochastic signal to chaotic dynamic signal. Dispersion theory was used to explain the above phenomenon. During vacancy dispersion , the main cause of noise is the stochastic dispersion of vacancies ; during the process of vacancies accumulation to void nucleation , the main cause of noise is the change from stochastic dispersion to ballistic chaotic cavity transport. Compared with traditional parameters , the result showed that correlation dimension could be used to predict the invalidation of electromigration damage.

**Keywords** : electromigration , noise , correlation dimension , chaos

**PACC** : 6630Q , 7360D , 0540 , 0545

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60376023 ).