

# 金属互连电迁移噪声的分形特征<sup>\*</sup>

陈春霞 杜磊 何亮 胡瑾 黄小君 卫涛

(西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2007 年 2 月 19 日收到, 2007 年 4 月 12 日收到修改稿)

为了研究金属互连电迁移失效机理并寻找新的电迁移表征参量, 应用分形理论, 通过电子扩散轨迹分形维数, 将电迁移噪声时间序列分形维数与晶粒间界分形维数相联系, 确定了噪声时间序列分形维数在电迁移演变中的变化趋势. 研究表明, 在金属互连电迁移前期, 晶粒间界形貌越来越复杂, 致使噪声时间序列的分形维数逐渐增大; 成核后, 由于空位凝聚成空洞, 晶粒间界形貌变得较成核前规则, 致使噪声时间序列的分形维数减小; 成核时刻是其转折点. 实验结果证明理论分析的正确性, 噪声时间序列的分形维数可望作为金属互连电迁移演变的表征参量.

关键词: 电迁移, 金属互连, 分形

PACC: 7360D, 6630Q

## 1. 引 言

金属互连电迁移是由于互连线中金属原子受到运动电子的作用引起的物质输运现象. 只要互连线中电流足够大, 电迁移现象就不可避免. 随着 VLSI 特征尺寸向着深亚微米甚至纳米尺度发展, 电流密度大幅度增加, 达到  $\text{MA}/\text{cm}^2$  的数量级, 电迁移引发的失效越来越显著, 引起人们极大关注<sup>[1, 2]</sup>.

电迁移过程中互连线经历着空位的扩散、聚集和空洞成核、长大等一系列材料的微观结构变化<sup>[3]</sup>. 自从 1968 年 Rosenberg 和 Berenbaum 借助电阻测量研究电迁移过程以来<sup>[4]</sup>, 电阻变化已经成为表征金属互连电迁移损伤的标准参量<sup>[5]</sup>. 电阻可以很好地表征电迁移空洞成核和长大时期互连线内部微观结构变化<sup>[6]</sup>, 但随着互连工艺的进步, 实验发现样品在电迁移前期, 有很长一段电阻潜伏期<sup>[7]</sup>, 使电阻参量无法表征此阶段电迁移的演变. 1973 年 Vossen 提出低频噪声可以用于金属互连可靠性评估<sup>[8]</sup>. 噪声检测方法以其敏感<sup>[9]</sup>和测试条件接近电路正常工作条件、非破坏性和灵敏度高等优点引起人们重视. 但是到目前为止, 几乎所有器件噪声分析均建立在噪声功率谱的基础上. 由于功率谱是建立在傅里叶分析的基础上, 它只能反映噪声信号的时域全局特性, 不能反映噪声局部奇异性, 因此, 基于噪声功率谱的表

征参量(功率谱幅值  $S_f(f)$  和频率指数  $\gamma$ ) 有其局限性.

近年来, 人们已经注意到这一点. 例如 Cher 等人用时域分析方法分析电迁移噪声信号<sup>[10]</sup>. 此外, 分形理论也开始应用于金属互连电迁移研究, 文献 [11—13] 认为晶粒间界的微观几何结构具有分形形貌特征, 而  $1/f$  噪声<sup>[9]</sup> 除具有频率特性外, 也具有分形特性<sup>[14]</sup>. 因此, Panin 等将分形理论用于电迁移分析<sup>[15, 16]</sup>. 但是, 他们的工作的局限性是分别研究晶粒间界的分形特征和噪声的分形特征, 而没能将这两种分形特征联系起来. 本文应用分形及渗流理论, 建立起电迁移噪声时间序列分形维数与晶粒间界分形维数之间的关系, 确定了噪声时间序列分形维数在电迁移演变中的变化趋势, 并通过实验予以验证.

## 2. 理 论

在金属铝互连电迁移过程中, 电迁移主要产生于晶粒间界处<sup>[17, 18]</sup>. 晶粒间界与晶粒内部相比, 不仅空位多, 而且晶格出现畸变, 因此可以将晶粒间界看作是分形结构<sup>[11—13]</sup>. 电场作用下电子在晶粒间界的扩散-漂移的输运可以看作是电子在分形渗流网格上的随机行走. 而在电迁移过程中, 空位向晶粒间界处扩散、聚集导致分形渗流网格不断变化. 随着空位

<sup>\*</sup> 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.

浓度  $n$  增大, 格点被空位占据的概率  $p$  变大. 当空位浓度达到临界值  $n_c$  时, 格点被空位占据的概率达到临界值  $p_c$ , 可认为此时晶粒间界达到渗流导通临界状态. 空位占据格点的概率超过临界值  $p_c$ , 渗流集团将不连通, 电子难以通过晶粒间界, 金属互连线出现断路.

据以上分析, 可以应用渗流理论描述金属互连电迁移过程. 根据渗流的反常扩散理论及扩散的谱密度与格林函数方法, 晶粒间界电迁移过程中电子扩散运输的电流噪声的时间序列分形维数  $D_s$  与电子扩散轨迹维数  $D_f$  满足关系<sup>[19]</sup>

$$D_s = \frac{D_f}{2 + \theta}, \quad (1)$$

其中  $\theta$  是反常扩散指数, 当  $\theta = 0$  时, 表示反常行为消失.

另外, 由于晶粒间界具有分形结构, 电子在其间的扩散可以用分形体上的无规行走模拟. 由分形体上的无规行走理论可知, 电流噪声的时间序列分形维数  $D_s$ 、电子扩散轨迹的分形维数  $D_f$  以及晶粒间界的分形维数  $d_f$  三者之间满足关系<sup>[19]</sup>

$$D_f = \frac{2d_f}{D_s}. \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式, 消去  $D_f$ , 可得

$$D_s = \sqrt{\frac{2d_f}{2 + \theta}}. \quad (3)$$

(3)式表明噪声时间序列分形维数  $D_s$  随晶粒间界的分形维数  $d_f$  增大而增大、减少而减少. 这是由于, 电子行走轨迹与其行走空间(晶粒间界)的形貌有关, 晶粒间界越“崎岖不平”, 其维数  $d_f$  会越大. 电子在其上行走时, 遇到的障碍就越多, 其路径势必会越迂回曲折, 从而电子扩散轨迹分形维数  $D_f$  就会越大. 另外, 电子遇到的障碍越多说明电子在运动中受到缺陷散射的概率就越大. 电子与缺陷的每次散射都会在不同程度上表现为噪声信号的突变. 因此, 电子扩散轨迹分形维数  $D_f$  越大, 信号突变会越

多, 信号就越复杂, 即信号的复杂度就越大. 信号的复杂度在一定程度上可用其分形维数  $D_s$  表示. 所以, 晶粒间界分形维数  $d_f$  越大, 电子扩散轨迹的分形维数  $D_f$  就越大, 随之  $D_s$  就越大. 反之亦然. 在电迁移前期, 随着空位向晶粒间界扩散、聚集, 晶粒间界处形貌会越来越复杂,  $d_f$  会逐渐上升, 随之  $D_s$  上升. 当晶粒间界处空位浓度达到饱和时, 空位瞬间聚集成空洞, 空洞成核长大. 当空位聚集成空洞以后, 空位浓度减少. 这一变化致使分形维数  $d_f$  下降, 按照(3)式  $D_s$  亦下降. 故电迁移噪声时间序列的分形维数  $D_s$  在空洞成核前呈上升趋势, 空洞成核后呈下降趋势, 成核时刻是其转折点.

### 3. 验证实验

为了得到电迁移过程中晶粒间界的形貌变化以及随之带来的电子扩散轨迹和电噪声变化, 验证上述模型的正确性. 本文采用电迁移加速失效实验来改变晶粒间界形貌变化. 在此实验过程中, 分别采集样品的电阻、噪声时间序列和噪声功率谱, 以便进行比较分析. 本实验样品为标准 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  $1 \mu\text{m}$  标准 CMOS 工艺制造.

为了确保实验的正确性和可对比性, 本文进行了两组实验. 第一组: 大电流的恒定应力加速失效实验. 为了在较短时间内获得充分的电迁移损伤数据. 本组实验对已经老化一定程度的样品 E06 先进行 35 mA 电流的恒定应力加速失效实验 15 h, 然后加大应力到 40 mA 老化, 直至断条. 第二组: 电迁移加速失效退火实验. 为了与第一组实验进行对比, 本组实验对已经老化一定程度的样品 S1, 再次进行老化 (453 K 热应力老化 1 h), 然后断开控温装置电源, 测量样品噪声随温度的变化. 初始测试温度为 453 K, 随后在烘箱密闭保温情况下, 每隔 10 min 测试一次, 直至室温. 两组实验的应力条件和样品参数如表 1.

表 1 电迁移加速失效实验的应力条件和样品参数

样品编号	加速温度/K	加速电流/mA	测试温度/K	测试电流/mA	样品电阻/ $\Omega$	样品宽、长和厚/ $\mu\text{m}$
E06	293	35/40	293	20	74.9	1.7/1335/0.5
S1	453(1 h)	0	炉温	20	65.4	2/1325/0.5

实验由老化与噪声测试两部分组成. 老化部分由恒流源 KEITHLEY 238 及台式烘箱组成, 噪声测试

部分由 NF-SA-200F3 低噪声放大器、EG&G PARC113 低噪声前置放大器及 HP3528A 型双通道频谱分析

仪组成.

### 4. 实验结果及讨论

金属互连电迁移过程可分为三个阶段,电阻变化是其常用的表征参量:前期阶段,电阻处于潜伏期,阻值几乎不变;空洞成核时刻,电阻值发生突变;空洞长大阶段,电阻值随空洞长大而急剧增加<sup>[3,6,20]</sup>.金属互连电迁移样品的电阻值和噪声时间序列分形维数值在加速失效实验过程中的变化如图1所示.其中图1(a)是对本文样品E06进行35 mA电流的恒定应力加速失效实验15 h所得的噪声时间序列分形维数与电阻值变化规律,图1(b)是对样品E06接着进行40 mA电流的恒定应力加速失效实验所得的噪声时间序列分形维数与电阻值变化规律.图2是Panin实验小组在金属互连薄膜失效过程中对薄膜形貌分形维数和电阻值的分析结果图<sup>[15,16]</sup>.从图中可知,35 mA应力及40 mA应力的前

9 h内样品E06处于电迁移损伤前期,即电迁移内部仅仅是空位扩散、聚集阶段.此阶段电迁移噪声时间序列分形维数持续上升;在40 mA应力的第9 h空洞成核,噪声时间序列分形维数 $D_s$ 达最大值;9 h以后空洞长大, $D_s$ 下降;可见空洞成核时刻是 $D_s$ 的转折点.此结果与本文理论分析结果相一致.本文实验结果与图2中Panin实验结果相对比,Panin实验中的分形维数 $d_f$ 在2.4到2.9之间变化,而本文实验中的 $D_s$ 却在1.5到2.0之间变化.分形维数数值上的差异在于Panin实验的分形维数 $d_f$ 是薄膜形貌分形维数,而本文实验计算的是互连线样品噪声时间序列分形维数 $D_s$ .对比结果显示,在空洞成核之前,两个分形维数都是单调增加;空洞成核时刻,两个分形维数均达到最大值,接着出现下降.(3)式显示,同一样品的分形维数 $d_f$ 与噪声时间序列分形维数 $D_s$ 存在正相关关系.通过Panin实验结果与本文实验结果对比,间接验证了(3)式的正确性.

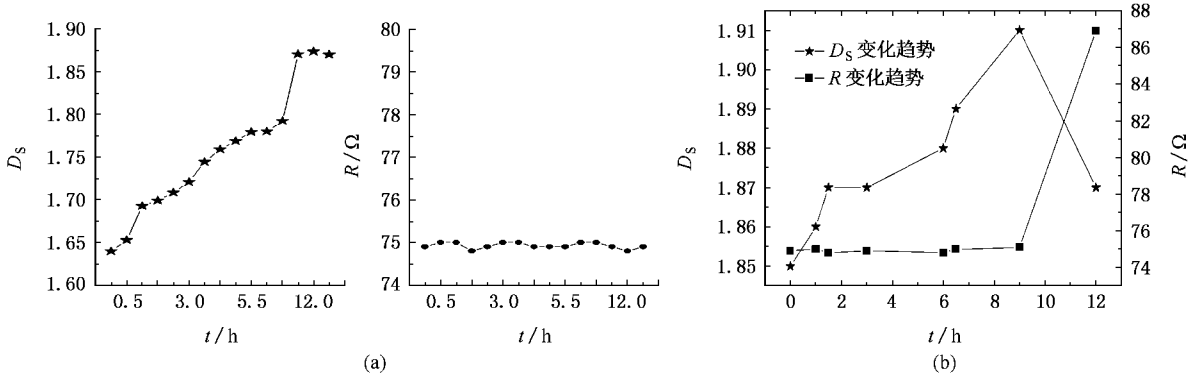


图1 噪声时间序列分形维数值与电阻值在样品E06加速失效实验过程中的变化 (a)35 mA应力;(b)40 mA应力

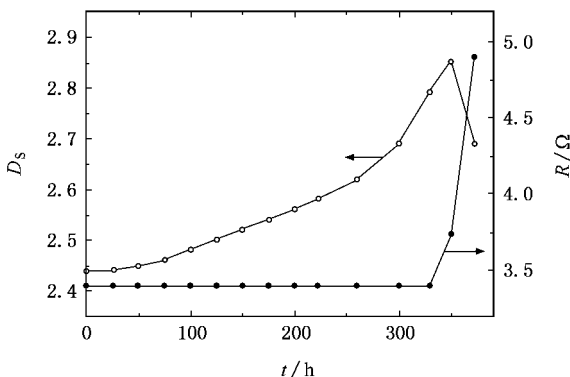


图2 薄膜形貌分形维数和电阻值在金属互连薄膜失效过程中的分析结果图(引自 Ref.[15])

$1/f^\gamma$  噪声通常所采用的分析参量是功率谱 $S_V(f)$ 和频率指数 $\gamma$ <sup>[21]</sup>.电迁移前期阶段,噪声表现为 $1/f$ 噪声,频率指数 $\gamma$ 在1.0附近波动.空洞成核后,噪声中出现 $1/f^2$ 噪声,空洞成核时 $\gamma$ 值突变<sup>[9]</sup>.图3为金属互连电迁移样品的噪声时间序列分形维数与噪声频率指数在加速失效实验过程中的变化曲线.从图中可见,电迁移前期频率指数 $\gamma$ 在1.1左右波动,成核后 $\gamma$ 值突变到1.55左右.这一结果与文献[9]报道一致.图4给出样品S1退火实验中 $\gamma$ 值和 $D_s$ 的变化曲线.在图4第一张图中,频率指数仅在1附近一定范围内波动,但是噪声分形维数 $D_s$ 却逐渐变小,可见 $D_s$ 也可以描述样品电迁移逆过程的变化.

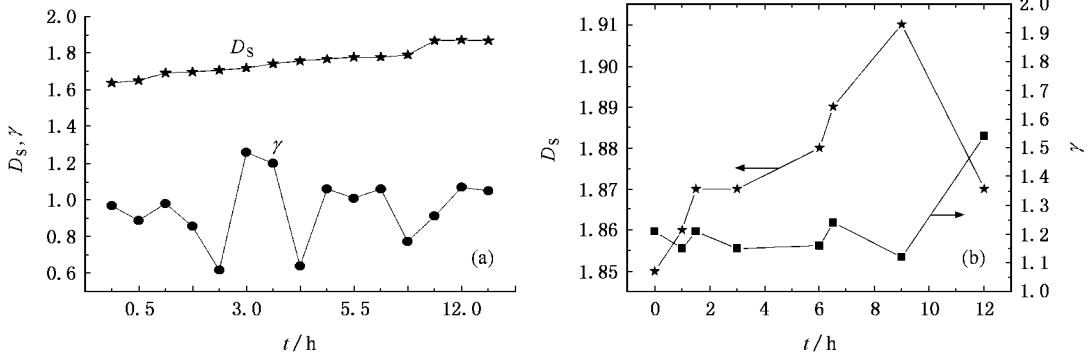


图3 噪声时间序列分形维数与噪声频率指数在样品 E06 加速失效实验过程中的变化 (a) 35 mA 应力 ;(b) 40 mA 应力

时间序列分形维数与噪声功率谱  $f = 100 \text{ Hz}$  频率点幅值变化的相关性图示. 在金属互连电迁移研究中, 噪声功率谱  $S_v(f)$  幅值作为电迁移表征参量已建立起相应的表征理论和模型. 通过分析噪声分形分维数与功率谱幅值之间的相关性分析, 并借助功率谱幅值变化与晶粒间界内部结构变化之间的联系, 可以帮助我们理解电迁移过程中噪声分形维数变化产生的原因. 噪声功率谱幅值与电子的散射有关, 而散射强弱由散射中心数目和散射中心的散射截面决定. 在电迁移的空位扩散和聚集阶段, 电子的散射中心主要是空位, 其散射截面不变, 而空位不断产生和聚集致使空位浓度变大, 散射中心数目增多. 因此电子受到的散射增强, 噪声功率谱幅值变大, 同时散射增强也使得噪声分形维数增大. 可见, 从散射理论可知在空位扩散和聚集阶段, 噪声功率谱幅值与分形维数同步增大, 两者正相关, 这与图 5 所示的实验结果是一致的. 成核后, 空位聚集形成空洞, 散射中心数目减少, 但是总散射截面反而增加了, 载流子受到

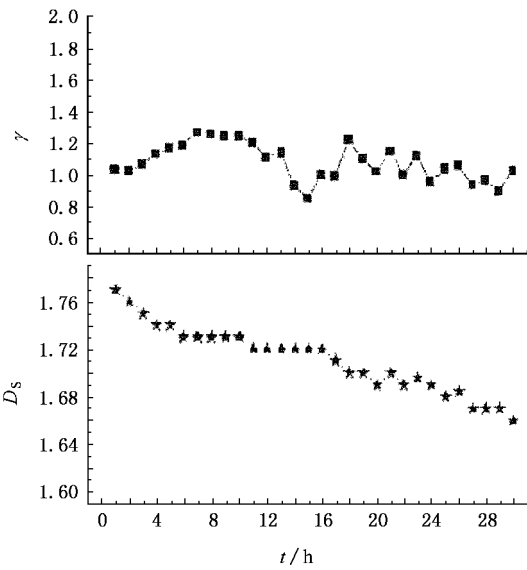


图4  $\gamma$  值和  $D_s$  在样品 S1 电迁移退火实验中的变化趋势

图 5 给出了样品 E06 加速失效实验过程中噪声

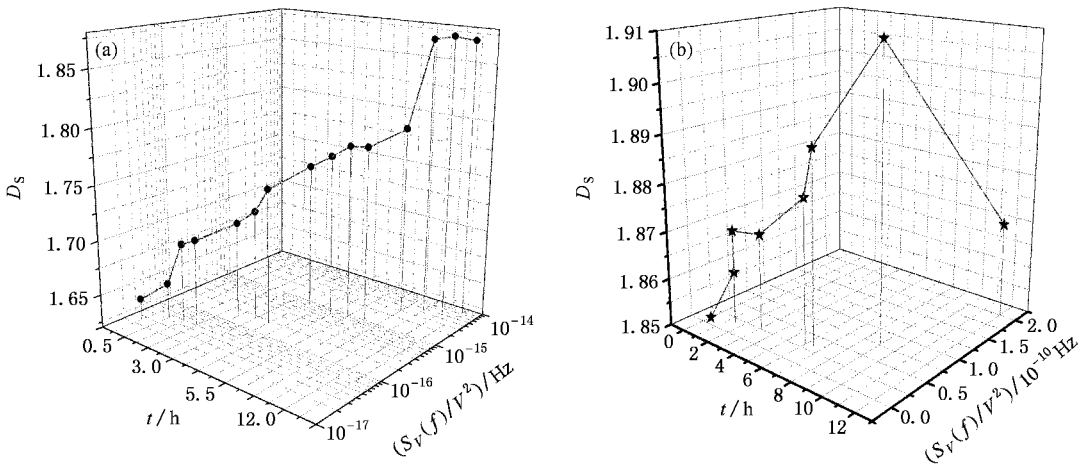


图5 样品 E06 加速失效实验过程中噪声时间序列分形维数与噪声功率谱点幅(100 Hz 点)幅值变化的相关性 (a) 35 mA 应力 ;(b) 40 mA 应力

的散射继续增强,因此噪声功率谱幅度继续上升.但是,空洞作为介观混沌腔散射源<sup>[22]</sup>,其散射噪声具有了确定性的成分,不同于随机噪声,因此时间序列分形维数  $D_s$  在成核后反而下降.这一结论与图 5 (b)后一段曲线是一致的.

## 5. 结 论

本文应用分形理论,通过电子扩散轨迹分形维

数,将电迁移噪声时间序列分形维数与晶粒间界分形维数相联系,确定了噪声时间序列分形维数在电迁移演变中的变化趋势.研究结果表明,在金属互连电迁移前期,噪声时间序列的分形维数逐渐增大;成核后,噪声时间序列的分形维数减小;成核时刻是其转折点.实验结果证明理论分析的正确性.

- [ 1 ] Oates A S 1996 *Microelectron. Reliab.* **36** 925
- [ 2 ] Tu K N 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 5451
- [ 3 ] Doan J C, Bravman J C, Flinn P A *et al* 1999 *IEEE Annual International Reliability Physics Symposium.* 206
- [ 4 ] Rosenberg R, Berenbaum L 1968 *Appl. Phys. Lett.* **12** 201
- [ 5 ] Pierce D G, Brusius P G 1997 *Microelectron. Reliab.* **37** 1053
- [ 6 ] Doan J C, Bravman J C, Flinn P A *et al* 2000 *Microelectron. Reliab.* **40** 981
- [ 7 ] Vandamme L K J 1994 *IEEE Transactions on Electronic Devices.* **41** 2176
- [ 8 ] Vossen J L 1973 *Appl. Phys. Lett.* **23** 287
- [ 9 ] 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 ]
- [ 10 ] Cher M T, Shin Y L 2002 *IEEE. Device and Materials Reliability* **2** 30
- [ 11 ] Xiong Z X 2000 *Fractal study of chinaware material* ( Beijing : Science Press )( in Chinese )[ 熊兆贤 2000 陶瓷材料的分形研究(北京 科学出版社) ]
- [ 12 ] Ma J J, Xu G L 2004 *China Ceramic Industry* **11** 55[ 马建军、徐光亮 2004 中国陶瓷工业 **11** 55 ]
- [ 13 ] Takahashi M, Nagahama H 2001 *Applied Surface Science* **182** 297
- [ 14 ] Gao J B, Yinhe C, Jae M L 2003 *Phys. Lett. A* **314** 392
- [ 15 ] Panin A, Shugur A, Schreiber J 2003 *Surface Science* **524** 191
- [ 16 ] Panin A V, Chun H G, Shugurov A R *et al* 2003 *Acta Metallurgica Sinica ( English Letters )* **16** 249
- [ 17 ] Attardo M J, Rutlage R, Jack R C 1971 *J. Appl. Phys.* **42** 4343
- [ 18 ] Korhonen M A, Borgesen P, Brown D D *et al* 1993 *Materials Research Society Symposium Proceeding* **309** 101
- [ 19 ] Yang Z R 1996 *Fractal physics* ( Shanghai :Shanghai Scientific and Technological Education Publishing House )( in Chinese )( 杨展如 1996 分形物理学(上海 :上海科技教育出版社) ]
- [ 20 ] Zong Z X, Du L, Zhuang Y Q *et al* 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5872 (in Chinese)[ 宗兆翔、杜 磊、庄奕琪等 2005 物理学报 **54** 5872 ]
- [ 21 ] Neri B, Diligenti A and Bagnoli P E 1987 *IEEE Trans. Electron. Dev.* **34** 2317
- [ 22 ] Mikhail L P 2005 *Dissertation of Cornell University* 23

# Fractal character of noise in electromigration in metal interconnection \*

Chen Chun-Xia Du Lei He Liang Hu Jin Huang Xiao-Jun Wei Tao

( *School of technical physics , Xidian University , Xi 'an 710071 , China* )

( Received 19 February 2007 ; revised manuscript received 12 April 2007 )

## Abstract

Based on fractal theory , through the fractal dimension of electro-diffusion , the dimensions of noise time series and grain boundary are correlated. The change of noise dimension is shown to be useful for studying the damage mechanism and determining the parameters for electromigration. The picture of grain boundary becomes complicated in the early period of electromigration , but after the voids are informed , it becomes more regular. So the fractal dimension of time series increases during the early stage of electromigration and goes down after the voids are informed. The theoretical analysis is confirmed by experiment , the dimension of noise time series may be a new characteristic parameter for metallic interconnection electromigration.

**Keywords** : electromigration , metallic interconnection , fractal

**PACC** : 7360D , 6630Q

---

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