

基于微观结构的 Cu 互连电迁移失效研究*

吴振宇[†] 杨银堂 柴常春 刘莉 彭杰 魏经天

(西安电子科技大学微电子学院, 宽禁带半导体材料与器件教育部重点实验室, 西安 710071)

(2011年2月10日收到; 2011年4月21日收到修改稿)

提出了一种基于微观晶粒尺寸分布的 Cu 互连电迁移失效寿命模型. 结合透射电子显微镜和统计失效分析技术, 研究了 Cu 互连电迁移失效尺寸缩小和临界长度效应及其物理机制. 研究表明, 当互连线宽度减小, 其平均晶粒尺寸下降并导致互连电迁移寿命降低. 小于临界长度的互连线无法提供足够的空位使得铜晶粒耗尽而发生失效. 当互连长度大于该临界长度时, 在整个电迁移测试时间内, 部分体积较小的阴极端铜晶粒出现耗尽情况. 随着互连长度的增加该失效比例迅速增大, 电迁移失效寿命减小. 当互连长度远大于扩散长度时, 失效时间主要取决于铜晶粒的尺寸, 且失效寿命和比例随晶粒尺寸变化呈现饱和的波动状态.

关键词: Cu 互连, 电迁移, 微观结构

PACS: 85.40.Ls, 66.30.Qa, 91.60.Ed

1 引言

在现代集成电路工艺中, 由于 Cu 的电阻率较低, 抗电迁移和应力迁移的能力较强, 且 Cu 互连双镶嵌制造工艺的兼容性好、成本低, Cu 互连已经替代 Al 互连成为主导互连技术. 电迁移失效是 Cu 互连可靠性的重要问题之一^[1]. 在金属导线中, 沿电场反方向运动的电子与金属离子进行动量交换, 从而导致金属离子产生由扩散主导的质量运输, 这种现象被称为电迁移. 在电迁移过程中, 导线的金属离子从阴极向阳极方向移动, 并在原子流量发生变化处形成空洞或小丘, 分别引起金属互连线的开路或短路. 一般地, Cu 互连电迁移失效时间符合对数正态分布, 空位主导扩散路径为 Cu/介质阻挡层界面^[2,3].

微观效应是影响 Cu 互连电迁移寿命的重要因素, 包括互连材料结构因素^[4-7]、临界长度效应^[8]、电流拥挤效应^[9]、蓄水池效应^[10]以及焦耳加热效应^[11]等. 随着集成电路工艺特征尺寸不断缩小, 尤其当铜晶粒尺寸降低到互连宽度以下时, Cu 互连微观结构对于互连可靠性的影响更加

显著, 而针对晶粒微观结构研究电迁移失效的报道并不多见. 本文提出了一种基于微观晶粒尺寸分布的 Cu 互连电迁移失效寿命模型, 结合透射电子显微镜和统计失效分析技术研究了 Cu 互连电迁移失效现象, 探讨了 Cu 互连电迁移失效尺寸缩小和临界长度效应, 模型模拟结果与实验结果符合良好.

2 实验方法

图 1 给出了 Cu 互连电迁移失效模型示意. 对于一段由不同大小晶粒构成的长度为 L 的 M1 互连, 从左向右的电子风力和金属原子进行动量交换使得金属原子向右扩散, 并最终在 M1 阴极端附近导致整个 Cu 晶粒耗尽, 进而引起互连电阻急剧增大. 而在此之前则由于存在有效的电流通道, 互连电阻未出现明显的变化. 由于金属阻挡层的存在使得 Cu 原子被限制在 M1 互连中, 因此在 M1 两端由于金属原子密度的变化而产生互连应力. 在电迁移失效样品设计时, M2 宽度较大而长度较小, 因此电迁移失效均发生在 M1 互连中. 同时, 由于采用 SiCN 介质作为 M1 顶部阻挡层, 因此空位扩散

* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 60806034) 资助的课题.

[†] E-mail: wuzhenyu@xidian.edu.cn

主导路径为 Cu/SiCN 界面。

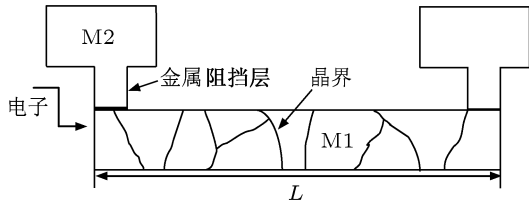


图 1 Cu 互连电迁移失效模型示意图

由电迁移效应产生的互连应力 σ 随时间 t 的变化可以用下式描述 [12]:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_c \left(\frac{\partial \sigma}{\partial x} + \gamma \right) \right], \quad (1)$$

其中, $k_c = DB\Omega/k_B T$ 为有效扩散系数, k_B 为 Boltzmann 常数, T 为温度, 电应力条件 γ 约为 5×10^{13} Pa/m, 扩散系数 D 约为 7×10^{-15} m²/h, Cu/介质体系有效弹性模量 B 约为 2×10^{10} Pa (低介电常数介质) 或 7×10^{10} Pa (氧化硅), 原子体积 Ω 约为 1.1×10^{-29} m³.

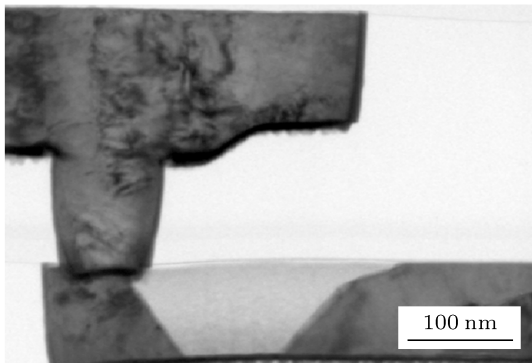


图 2 典型 Cu 互连电迁移失效透射电镜显微照片

图 2 给出了 Cu 互连电迁移失效的典型电子显微照片. 电迁移失效空洞大多在阴极端附近, 且该处 Cu 晶粒被完全耗尽. 因此本文假定在阴极 $x = 0$ 的位置从开始时因晶粒生长而产生微小空洞且由于电迁移作用一直长大 [13]. 同时, 在阳极 $x = L$ 的位置, 由于金属阻挡层的存在使得空位移动局限在此处, 从而得到下述边界条件:

$$\begin{aligned} \sigma(x = 0) &= 0, \\ \nabla \sigma(x = L) &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

在上述边界条件下, 忽略残余热应力, 求解方程 (1),

得到如下形式的解 [13]:

$$\begin{aligned} \sigma &= -\gamma \left[x - 2L \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \right. \\ &\quad \left. \times \exp(-m_0^2 k_c / L^2) \sin(m_0 x / L) / m_0^2 \right], \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $m_0 = (n + 1/2)\pi$.

由电迁移作用而生长的空洞大小 V_0 可以表示为

$$V_0(t) = (1/B) \int_0^L \sigma(x, t) dx. \quad (4)$$

将 (3) 式代入 (4) 式, 从而得到

$$\begin{aligned} V_0(t) &= \gamma L^2 / 2B \left[1 - 4 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \right. \\ &\quad \left. \times \exp(-m^2 k_c t / L^2) / m^3 \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

采用 Monte Carlo 方法来模拟获得每个互连样品的电迁移中值失效时间 (或称寿命). 对 N_0 个长度为 L 的互连线, 假定在 M1 阴极端的某个铜晶粒尺寸为 V_i ($i = 1, 2, \dots, N_0$), 因电迁移作用使得该晶粒完全耗尽所需要的时间 T_i 为

$$T_i = t(V_0(t) = V_i) \quad (i = 1, 2, \dots, N_0), \quad (6)$$

$$V_i = \text{lognrnd}(\mu, \sigma) \quad (i = 1, 2, \dots, N_0). \quad (7)$$

由上述失效时间 T_i , 代入对数正态分布拟合可以得到中值失效时间 [14]. 其累积失效率 CDF 计算方法采用下式 [15]:

$$\begin{aligned} CDF_i &= (i - 0.3) / (N_0 + 0.4) \\ &\quad (i = 1, 2, \dots, N_0). \end{aligned} \quad (8)$$

对于不同长度的互连样品, 在整个电迁移测试时间 T_0 内, 各长度互连样品失效比例 N 为

$$N = \sum C_i / N_0, \quad i = 1, 2, \dots, N_0, \quad (9)$$

$$C_i = \begin{cases} 1 & (T_i \geq T_0, i = 1, 2, \dots, N_0), \\ 0 & (T_i < T_0, i = 1, 2, \dots, N_0). \end{cases} \quad (10)$$

实验互连样品采用 65 nm Cu/SiO₂ (或低介电常数介质 MSQ) 工艺制备. 电迁移实验条件为: 电流 1 MA/cm², 温度 250 °C. 将互连电阻值相对变化 15% 作为失效判据. 统计失效分析中采用对数正态分布计算失效时间分布参数. 结合聚焦离子束和透射电子显微镜技术分析互连晶粒尺寸分布和电迁移失效微观分析. 取互连中线作为统计晶粒尺寸大小的依据, 且在统计中未区分孪晶. 获得大量晶

粒尺寸数据后,采用正态分布模型计算获得晶粒尺寸分布参数.

3 结果与讨论

图 3 给出了不同宽度 Cu 互连线微观结构的透射电镜显微照片. 由于工艺条件的不同,采用双大马士革工艺在沟槽中形成的 Cu 互连线与整个基底上生长铜薄膜的微观结构差异显著. 一般地,大面积生长的铜膜为晶粒尺寸较大的多晶结构. 而从图中可见, Cu 互连线中则包含晶粒尺寸较小的竹节状和多晶两种结构,且随着互连线宽度的增大,晶粒尺寸也增大. Cu 互连线电镀工艺一般会沉积额外的过载层 (overburden layer),其晶粒生长主要依赖于晶界迁移. 当制备较宽的互连线时,过载层中的大晶粒更容易延伸到沟槽中使得互连线具有较大的晶粒尺寸. 对于较窄的互连线,由于受到沟槽底部杂质钉扎 (pinning) 效应的限制更加显著,因此一般具有较小的晶粒尺寸. 与其他实验类似^[14],本文观察到的晶粒尺寸分布也与对数正态分布良好符合. 本实验计算获得的晶粒平均尺寸约为 0.26—0.31 μm ,均大于互连线宽度. 同时,实验观察到的空洞大小与晶粒尺寸非常接近,也验证了本文模型假设的合理性.

图 4 给出了 Cu 互连电迁移寿命随晶粒尺寸 (线宽) 的变化关系. 在 100 nm 及以下技术节点, Cu 互连寿命随晶粒尺寸 (线宽) 减小而显著下降,与大尺寸下观察到的电迁移寿命对互连线宽依赖无明显关系这一现象显然不同^[14,16]. 这可能是由于随着互连宽度的进一步降低 (< 100 nm 时),在沟槽中采用化学电镀方法填充生长金属连线时晶粒尺寸加速减小造成的. 当互连线宽度减小,在 Cu 互连线阴极端附近的晶粒尺寸减小,耗尽该处晶粒直至产生占据了整个互连线截面的空洞所需时间减小,从而导致互连电迁移寿命降低. 需要指出的是,尽管理论上 Cu 互连寿命随晶粒尺寸 (线宽) 减小而显著下降,但这一结论是在较大样本条件下获得的 (> 100). 而在实际电迁移寿命统计分析中,样本数量往往不超过 24 个. 这也可能是实际测试中难以观察到这一规律的原因之一. 因此,随着技术节点的进一步发展,在降低线宽的同时保持或减缓互连线中晶粒大小降低的速度,对于提高器件电路

的抗电迁移能力将具有重要的作用.

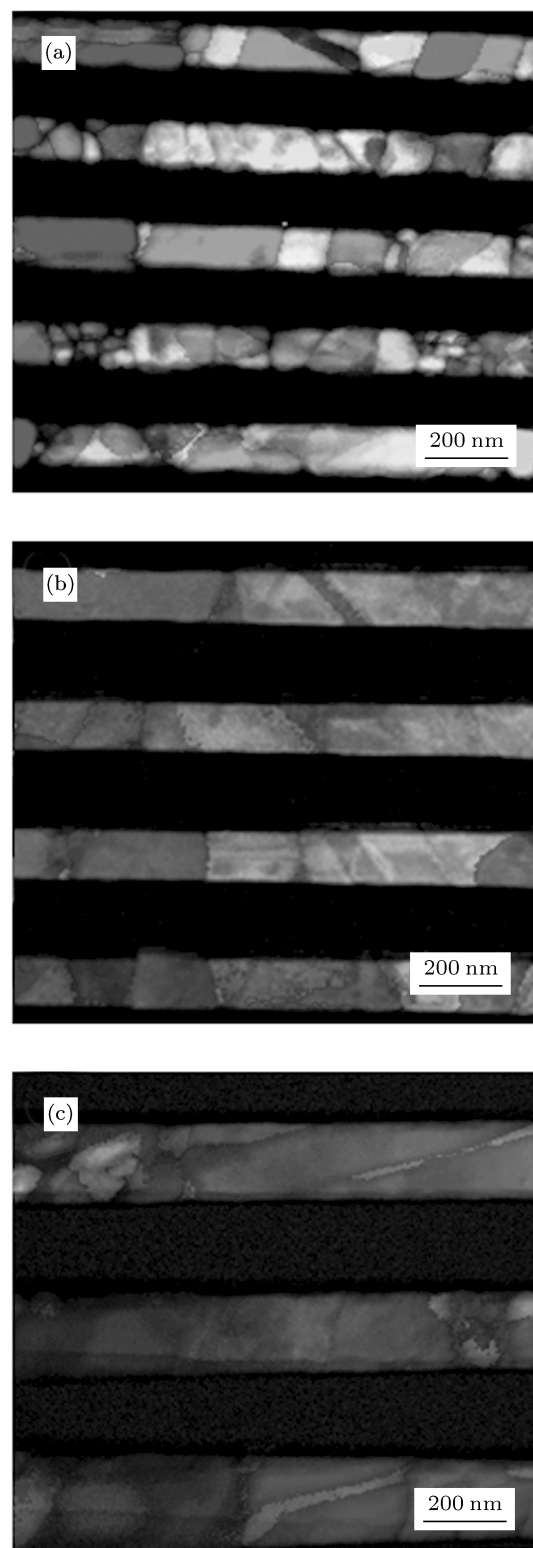


图 3 不同宽度 Cu 互连晶粒分布透射电镜显微照片 (a) 90 nm; (b) 120 nm; (c) 180 nm

图 5 给出了 Cu 互连电迁移累积失效率与失效时间模拟分布结果. 从图中可见,互连电迁移失效

个数随互连线长度的增加而上升,且当互连线长度小于某一长度时电迁移失效现象不再发生.由于电迁移的质量输运作用导致在整个互连线上产生应力梯度,且该应力梯度的方向与电子风力的方向相反,大小与互连线长度成反比.当互连长度小于某个临界长度,耗尽互连线阴极端附近整个晶粒所产生的回流应力梯度大于电子风力强度,因此难以发生电迁移失效.当互连线长度增大到临界长度,在电子风力作用下产生的扩散流密度与相反方向上回流应力梯度作用下的扩散流密度达到平衡.当互连线长度进一步增大,回流应力梯度的作用减弱,总扩散流密度增大,且在同一失效测试时间内参与空洞成核的空位增多,从而导致电迁移寿命左移,互连电迁移失效个数迅速增多.当互连长度远大于临界长度和扩散长度时,随着互连长度的增大,对电迁移作用有效互连长度不再变化,因此互连电迁移寿命和失效个数趋于稳定并随晶粒尺寸分布上下轻微波动.相对于目前已有的两种电迁移临界长度模型均与互连长度呈近似线性的变化关系而无法很好地解释这一饱和波动现象^[17,18],而本文的模型和实验结果符合良好.

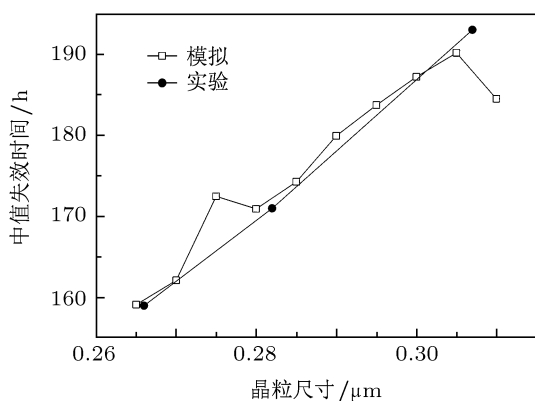


图4 Cu互连电迁移中值失效时间随晶粒尺寸的变化关系曲线

图6给出了Cu互连电迁移失效比例随线长的变化关系.从图中可以看出,Cu互连电迁移效应存在一个临界长度.当互连线长度小于该临界长度时,由于互连线无法提供足够多的空位,使得电迁移诱生空洞体积小于Cu互连晶粒尺寸,互连线中一直存在有效的电流通道,因此在整个电迁移测试时间内观察不到明显的互连电阻变化,即认为电迁移失效未发生.当互连长度大于该临界长度时,在整个电迁移测试时间内,部分体积较小的阴极端铜晶粒出现耗尽情况,且随着互连长度的增加该失效比

例迅速增大.在本实验中,该临界长度约18 μm(小于18 μm的失效个数为零,图中未具体示出).当互连长度远大于扩散长度($\sqrt{kT_0}$)时,此时线长影响基本可以忽略,使整个铜晶粒耗尽所需的时间主要取决于铜晶粒的尺寸,从而出现失效比例随线长变化呈现饱和的波动状态,且该波动幅度与晶粒尺寸方差密切相关.对于低介电常数材料互连,由于低介电常数材料与Cu互连线顶部的粘附性稍差,因此沿该顶部界面空位的有效扩散系数较高,从而在相同电流应力时间内互连线失效比例更高.同时低介电常数材料的杨氏模量较小,Cu/介质系统整体的有效弹性模量B较小.从(5)式可知空洞生长速率主要由系数 $\gamma L^2/2B$ 决定.因此对于低介电常数材料互连,其电迁移失效临界长度更小.

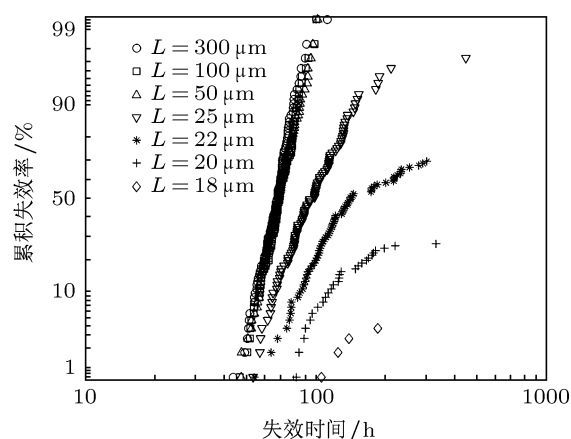


图5 Cu互连电迁移累积失效率与失效时间模拟分布图

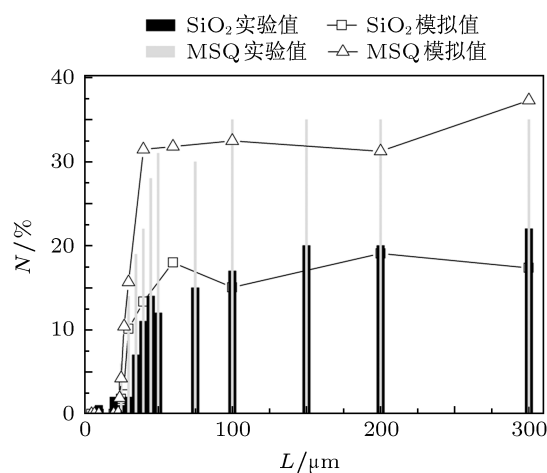


图6 Cu互连电迁移失效比例N随线长L的变化关系图

4 结论

结合微观分析和统计失效分析技术,研究了Cu

互连电迁移失效现象, 基于铜晶粒微观结构探讨了 Cu 互连电迁移失效尺寸缩小和临界长度效应, 并相应地提出了一种电迁移晶粒尺寸失效寿命模型. 研究表明, Cu 互连电迁移失效寿命随晶粒尺寸的减小而降低. 当互连线宽度增大, 其平均晶粒尺寸上升并导致互连电迁移寿命提高. 小于临界长度的互连线无法提供足够的空位使得铜晶粒耗尽而发生失效. 当互连长度大于该临界长度时, 在整个电迁移测试时间部分体积较小的阴极端铜晶

粒出现耗尽情况, 且随着互连长度的增加该失效比例迅速增大, 电迁移失效寿命减小. 当互连长度远大于扩散长度时, 失效时间主要取决于铜晶粒的尺寸, 并出现失效寿命和比例随线长变化呈现饱和的波动状态, 且该波动幅度与晶粒尺寸方差密切相关. 当采用弹性模量更小的低介电常数材料取代氧化硅时, 由于有效扩散系数增大而引起电迁移失效加剧.

-
- [1] Rosenberg R, Edelstein D C, Hu C K, Rodbell K P 2000 *Annu. Rev. Mater. Sci.* **30** 229
- [2] Tu K N 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 5451
- [3] Hau-Riege C S 2004 *Microelectron. Reliab.* **44** 195
- [4] Hu C K, Gignac L, Rosenberg R 2006 *Microelectron. Reliab.* **46** 213
- [5] Hau-Riege C S, Thompson C V 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 3451
- [6] Hu C K, Gignac L, Rosenberg R, Liniger E, Rubino J, Sambucetti C, Stamper A, Domenicucci A, Chen X 2003 *Microelectron. Eng.* **70** 406
- [7] Chai Y, Chan P C H, Fu Y Y, Chuang Y C, Liu C Y 2008 *IEEE Elec. Dev. Lett.* **29** 1001
- [8] Ogawa E T, Bierwag A J, Lee K D, Matsushashi H, Justison P R, Ramamurthi A N, Ho P S, Blaschke V A, Griffiths D, Nelsen A, Breen M, Havemann R H 2001 *Appl. Phys. Lett.* **78** 2652
- [9] Tu K N, Yeh C C, Liu C Y, Chen C 2001 *Appl. Phys. Lett.* **76** 988
- [10] Shao W, Vairagara A V, Tung C H, Xie Z L, Krishnamoorthy A, Mhaisalkar S G 2005 *Surf. Coat. Technol.* **198** 257
- [11] Wu W, Yuan J S, Kang S H, Oates A S 2001 *Solid State Electron.* **45** 2051
- [12] Korhonen M A, Børgesen P, Tu K N, Li C Y 1993 *J. Appl. Phys.* **73** 3790
- [13] Korhonen M A, Børgesen P, Brown D D, Li C Y 1993 *J. Appl. Phys.* **74** 4995
- [14] Lin M H, Chang K P, Su K C, Wang T H 2007 *Microelectron. Reliab.* **47** 2100
- [15] Nelson W 1982 *Applied Life Data Analysis* (New York: Wiley)
- [16] Vairagar A V, Mhaisalkar S G, Krishnamoorthy A 2004 *Micro-electro. Reliab.* **44** 747
- [17] Blech I A 1976 *J. Appl. Phys.* **47** 1203
- [18] Lee K D, Ogawa E T, Matsushashi H, Justison P R, Ko K S, Ho P S, Blaschke V A 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 3236

A microstructure-based study on electromigration in Cu interconnects*

Wu Zhen-Yu[†] Yang Yin-Tang Chai Chang-Chun Liu Li Peng Jie Wei Jing-Tian

(Key Laboratory of Ministry of Education for Band-Gap Semiconductor Materials and Devices, School of Microelectronics,
Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 10 February 2011; revised manuscript received 21 April 2011)

Abstract

A microstructure-based electromigration model of Cu interconnects is proposed. Mechanisms of scaling and critical length effects of Cu electromigration are studied by transmission electron microscopy and statistical failure analysis. The results show that the lifetime of electromigration is reduced with Cu grain size decreasing when the width of interconnect is scaled down. Electromigration failure is not observed when the interconnect length is smaller than the critical length due to insufficient vacancies for voiding the whole Cu grains. Some small grains are vacated at the cathode end when the interconnect length is larger than the critical length during the testing. The proportion of failures increases and the lifetime decreases with interconnect length increasing. The failure time is dependent mainly on Cu grain size, and the failure lifetime and failure proportion fluctuate with grain size varying when the interconnect length is beyond the diffusion length.

Keywords: Cu interconnect, electromigration, microstructure

PACS: 85.40.Ls, 66.30.Qa, 91.60.Ed

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60806034).

[†] E-mail: wuzhenyu@xidian.edu.cn