

应力诱发界面迁移下晶内孔洞的演化¹⁾

余文韬²⁾ 黄佩珍³⁾

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

摘要 随着微电子技术的迅猛发展, 集成电路中内连导线的失效问题引起广泛关注. 内连导线内部孔洞萌生、长大、漂移和失稳形成狭长裂纹, 从而导致电路的开路失效. 这是内连导线失效的常见形式. 而界面迁移是导致微结构形态演化的主要机制之一. 本文基于界面迁移下微结构演化的经典理论和弱解描述, 建立了应力诱发界面迁移下微结构演化的有限单元法, 并验证了算法的可靠性. 对铜内连导线中晶内孔洞的演化进行了数值模拟, 详细分析了应力、线宽及形态比对晶内孔洞演化的影响. 研究表明, 椭圆形晶内孔洞存在生长和收缩两种演化分叉趋势. 通过大量数值分析得到了晶内孔洞演化的临界应力 $\bar{\sigma}_c$ 、临界线宽 \bar{h}_c 和临界形态比 β_c . 当 $\bar{\sigma} \geq \bar{\sigma}_c$, $\bar{h} \leq \bar{h}_c$ 或 $\beta \geq \beta_c$ 时, 晶内孔洞会沿长轴长大; 反之, 晶内孔洞会收缩甚至愈合. 此外, 应力 $\bar{\sigma}$ 越大、线宽 \bar{h} 越小或形态比 β 越大, 晶内孔洞越易发生长大, 且孔洞面积增大速度越快; $\bar{\sigma}$ 越小、 \bar{h} 越大或 β 越小, 晶内孔洞越易发生收缩, 且孔洞面积减小速度越快.

关键词 应力迁移, 界面迁移, 有限单元法, 晶内孔洞演化, 孔洞生长, 收缩

中图分类号: O343.1

文献标识码: A

doi: 10.6052/0459-1879-18-015

THE EVOLUTION OF INTRAGRANULAR VOIDS UNDER INTERFACE MIGRATION INDUCED BY STRESS MIGRATION¹⁾

Yu Wentao²⁾ Huang Peizhen³⁾

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract With the rapid development of microelectronics technology, the failure of interconnects in the integrated circuit raises wide attention. The interconnects inevitably exist some drawbacks, such as voids and cracks. If the drawbacks nucleate, grow and change their shape to form crack-like slits oriented perpendicular to an interconnect line, an open circuit could result. This is a common form of interconnects failure. And interface migration is one of the main mechanisms leading to the evolution of microstructure. Based on the classic theory and weak statement of interface migration, a finite-element method is developed to simulate the evolution of intragranular voids in copper interconnects caused by interface migration induced by stress migration. The validity of the method is confirmed by the agreement of the numerically simulated the undulating surface with that predicted theoretically. Through a large number of numerical simulations, we

2018-01-10 收稿, 2018-05-21 录用, 2018-05-21 网络版发表.

1) 江苏省自然科学基金(BK20141407)和江苏高校优势学科建设工程资助项目.

2) 余文韬, 硕士研究生, 主要研究方向: 微结构演化. E-mail: yuwt@nuaa.edu.cn

3) 黄佩珍, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 工程问题的力学建模与数值仿真. E-mail: pzhuang@nuaa.edu.cn

引用格式: 余文韬, 黄佩珍. 应力诱发界面迁移下晶内孔洞的演化. 力学学报, 2018, 50(4): 828-836

Yu Wentao, Huang Peizhen. The evolution of intragranular voids under interface migration induced by stress migration. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(4): 828-836

find that the evolution of the intragranular voids has two trends, namely, void growth and void shrinkage. And the shape of the void is governed by the stress, $\tilde{\sigma}$, the linewidth, \tilde{h} , and the initial aspect ratio of the intragranular void, β , and there exist critical values for these parameters ($\tilde{\sigma}_c$, \tilde{h}_c and β_c). When $\tilde{\sigma} \geq \tilde{\sigma}_c$, $\tilde{h} \leq \tilde{h}_c$ or $\beta \geq \beta_c$, the intragranular void will grow along the major axis; otherwise, the intragranular void will shrink into a cylinder. The increase of the stress, or the aspect ratio, or the decrease of the linewidth is beneficial to void growth. And the area of void growth will increase faster with bigger $\tilde{\sigma}$, smaller \tilde{h} or bigger β . But, the decrease of the stress or the aspect ratio, or increase the linewidth accelerates void shrinkage and the shrinkage area will decrease faster with smaller $\tilde{\sigma}$, bigger \tilde{h} or smaller β .

Key words stress migration, interface migration, finite element method, intragranular void evolution, void growth, shrinkage

引言

界面运动在许多材料微结构演化过程中扮演着重要作用,如复合陶瓷夹杂界面的裂纹开裂^[1]、复杂环境下薄膜形貌的演化^[2-3]、电子电路中金属内连导线中孔洞的演化^[4]、包含两相微结构的镍基单晶合金中位错的演化^[5]等等。随着科技的发展,电子电路集成规模日趋增大,电子元器件尺寸日趋减小,连接它们的金属内连导线的稳定性尤为重要。在应力场或电场作用下,内连导线内部显微裂纹、孔洞萌生、长大、漂移和失稳变形成狭长裂纹,从而导致电路的开路失效。这是内连导线失效的主要形式之一^[6-7]。因此,研究内连导线中孔洞的形态演化具有重要意义。

内连导线中孔洞演化主要依靠晶界或界面处的表面与界面原子运动。在许多实际问题中,根据试样外形和服役条件,孔洞演化可以是表面扩散、晶界扩散等固态扩散或是界面迁移单独控制,也可以是这些机制同时作用下进行。孔洞演化的外部驱动力主要包括应力迁移、电迁移和热迁移等。人们较早便认识到电迁移对金属内连导线中微结构演化的重要作用并展开研究^[8-9]。而在电迁移的研究中发现了热迁移现象。热迁移由大电流密度下的焦耳热效应产生的温度梯度所引起,往往与电迁移相互耦合并共同作用^[10]。应力迁移相关研究起步较晚,20世纪80年代才有报道^[11]。应力迁移主要来自于内连导线制备及服役过程中的热失配现象。研究人员发现,在423~523 K的温度范围内,较易发生应力迁移现象。由于导线和周围材料的热膨胀系数不同,产生的热失配应力可达800~900 MPa。导线即使不通电,也可能在应力迁移诱发下出现孔洞或裂纹,甚至断裂,对内连导线可靠性产生重要影响^[12-13]。目前,对内连导线内部孔洞或裂纹演化

已经有了一定的理论^[14-15]、实验^[16-18]和数值^[4,19-22]研究。而由于实际的材料系统常常是复杂多变的,为了使数学方程可解,常常必须对材料模型进行一些理想的假设。也就是说在材料建模方面并非已经完善。针对复杂问题逐一进行理论求解难度较大,数值模拟成为一种可行有效的方法。

但以往的研究大多着眼于固态扩散机制下的微结构的演化,对界面迁移机制下的关注较少。而界面迁移是导致微结构形态演化的主要机制之一。Suo等^[23-24]从Herring^[25]及Mullins^[26]提出的经典理论出发,结合线性动力学定律及自由能变分,提出了一种用以模拟相界、晶界等界面运动的有限单元法。基于Suo等^[23-24]的研究,Prevost等^[27]研究了应力作用下固体表面反应及延迟断裂。Huang等^[28]研究了界面迁移下三维晶体的演化,包括晶体的增长、刻面的形成及晶界沟槽的演变等。Yu^[29]研究了应力作用下固体表面缺陷处的裂纹成核过程。Huang等^[30-31]提出了仅在表面能和化学势差诱发的轴对称有限元模型,数值模拟了三维币型微裂纹的演化以及盘片状晶粒的长大。

目前,未见文献报道应力诱发界面迁移下内连导线中孔洞的演化过程。本文基于Suo等^[23-24]提出的界面迁移下微结构演化的弱解描述,建立应力诱发界面迁移下的有限单元法,对图1所示内连导线中晶内孔洞的形貌演化进行模拟研究。主要探讨了孔洞形态比 β 、应力 σ 及线宽 h 对孔洞演化的影响。

图1中的晶内孔洞形貌由形态比 $\beta = a/h_0$ 确定,其中 a 与 h_0 分别是椭圆形孔洞在 x , y 方向上的半轴长; h 是内连导线的线宽。内连导线视作理想线弹性体,在其边界处受到垂直均匀分布拉应力 σ_x , σ_y 作用,不考虑电场和温度场的影响。在内连导线实际服役过程中,由于钝化层和半导体基体的约束,垂直于平面维度的应变可视作无穷小,内连导线的

所有应变均发生在图示平面中, 故可将该问题简化为二维平面应变问题. 此外, 晶体视作各向同性, 晶体与环境间的化学势差 Δg 保持不变.

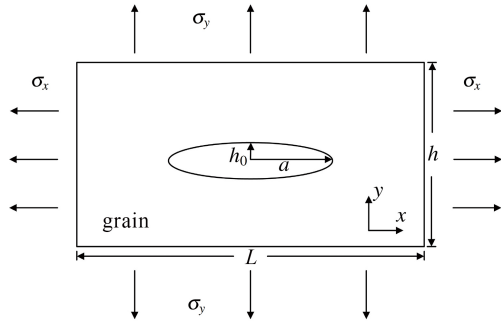


图 1 内连导线中晶内孔洞模型

Fig.1 A model of an intragranular void in an interconnect line

1 基本理论

1.1 界面迁移机制的弱解描述

在界面迁移机制下, 固体与环境间会发生物质交换, 即物质原子在固体表面堆积或逸出固体表面进入环境, 导致固体的表面形貌会发生变化^[23,27-28]. 而演化的驱动力 p 主要来自表面能 γ_s 、应变能密度 w 及固体与环境间的化学势差 Δg , 具体的形式可表示为

$$p = -\gamma_s \kappa - w - \Delta g \tag{1}$$

式中 κ 是晶体表面曲率, 且在凸界面上为正值. 当 $p > 0$ 时, 固体物质增加; $p < 0$ 时, 固体物质减小.

对于并非远离平衡状态的界面迁移过程, 界面每一点动力学定律为

$$v_n = Dp \tag{2}$$

式中 v_n 为表面法向速度, D 表示和温度相关的界面迁移率, 具体表达式为 $D = D_0 \exp(-q/kT)$. 其中 D_0 是频率因子, q 是激活能, k 是玻尔兹曼常数, T 是温度.

取表面法向虚位移为 δr_n , 系统总自由能的减小量 δG 可表示为

$$\delta G = - \int p \delta r_n dA \tag{3}$$

将式 (2) 代入式 (3) 可得

$$\delta G = - \int \frac{v_n \delta r_n}{D} dA \tag{4}$$

式 (4) 即是界面迁移机制的弱解描述.

1.2 有限元方法

本文研究的二维孔洞表面是一曲线, 可用一组线性单元模拟其演化. 如图 2 所示的单元长度为 l , 倾角为 θ , 单元 1, 2 节点的坐标为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$. 单元法向量可表示为 $n = (\sin\theta, -\cos\theta)$, 故单元上任一点坐标 (x, y) 可表示为

$$x = N_1 x_1 + N_2 x_2, y = N_1 y_1 + N_2 y_2 \tag{5}$$

式中形函数 N_1 和 N_2 为

$$N_1 = 1 - \xi, N_2 = \xi \tag{6}$$

其中 ξ 是无量纲坐标, 且在 1, 2 节点处无量纲坐标是 $\xi_1 = 0, \xi_2 = 1$.

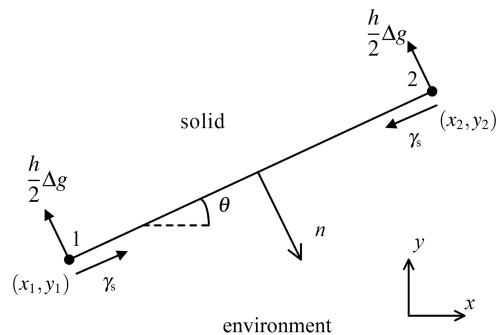


图 2 线性单元

Fig.2 A linear element

单元上任一点的法向位移 r_n 可表示为

$$r_n = N_1 x_1 \sin\theta - N_1 y_1 \cos\theta + N_2 x_2 \sin\theta - N_2 y_2 \cos\theta \tag{7}$$

用 (\dot{x}_1, \dot{y}_1) 和 (\dot{x}_2, \dot{y}_2) 表示 1, 2 节点的速度, 则单元上任一点法向速度 v_n 可表示为

$$v_n = N_1 \dot{x}_1 \sin\theta - N_1 \dot{y}_1 \cos\theta + N_2 \dot{x}_2 \sin\theta - N_2 \dot{y}_2 \cos\theta \tag{8}$$

而线性单元的自由能增量可表示为

$$\delta G^e = \gamma_s \delta l + \int (w + \Delta g) \delta r_n dA_s \tag{9}$$

由式 (4) 及式 (9) 积分整理可得单元控制方程

$$H^e \dot{x}^e = f^e \tag{10}$$

式中

$$H^e = \frac{1}{6D} \begin{bmatrix} 2S^2 & -2SC & S^2 & -SC \\ -2SC & 2C^2 & -SC & C^2 \\ S^2 & -SC & 2S^2 & -2SC \\ -SC & C^2 & -2SC & C^2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\dot{x}^e = [\dot{x}_1 \quad \dot{y}_1 \quad \dot{x}_2 \quad \dot{y}_2]^T \quad (12)$$

$$f^e = \gamma_s \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ -\cos\theta \\ -\sin\theta \end{bmatrix} + \frac{l}{2} \Delta g \begin{bmatrix} \sin\theta \\ -\cos\theta \\ \sin\theta \\ -\cos\theta \end{bmatrix} + \frac{l}{2} \begin{bmatrix} [(2/3)w_1 + (1/3)w_2] \sin\theta \\ -[(2/3)w_1 + (1/3)w_2] \cos\theta \\ [(1/3)w_1 + (2/3)w_2] \sin\theta \\ -[(1/3)w_1 + (2/3)w_2] \sin\theta \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中 S 为 $\sin\theta$, C 为 $\cos\theta$, w_1, w_2 分别是节点 1, 2 处应变能密度。

由上可见, 对于图 1 中的孔洞, 表面上的应变能密度、表面能和化学势差共同诱发孔洞表面发生界面迁移. 孔洞形态演化的数值计算步骤为: 首先, 用标准有限元法求得在当前构型下孔洞所在弹性体的应力场和应变场, 并提取表面各点应变能密度; 然后利用本文基于应力诱发界面迁移下的有限元控制方程(式(10))所开发的有限单元法程序计算表面各节点的速度; 再在给定时间增量 Δt 下, 求得各节点在 Δt 内的位移, 并形成新的孔洞表面. 反复迭代上述过程, 可得孔洞形貌随时间的演化过程.

2 可靠性验证

考虑如图 3 所示的和周围环境化学势相同(即 $\Delta g = 0$) 且仅受界面迁移机制的弹性体. 在小扰动假设下, 固体表面为余弦状曲线, 在水平方向受到均匀应力场 σ_0 的作用, λ 是波长, A 是表面的初始幅值. 针对曲线表面上任一点 (x, y) , 若给定横坐标 x 及时间 t , Srolovitz 得到纵坐标 y 的解析解^[32]

$$y(x, t) = -\frac{m\sigma_0^2 t}{2E} + A \exp \left[-m \left(\gamma_s a^2 - \frac{2\sigma_0^2}{E} a \right) t \right] \cos(ax) \quad (14)$$

式中 $a = 2\pi/\lambda$, E 是杨氏模量.

为了保证程序计算精度, 定义 $\varepsilon = (\int_0^l |y - \bar{y}| dx) / (\int_0^l |y| dx) \times 100\%$ 作为程序计算误差的衡量标准. 其中 y 是式(14)计算得到的解析解, \bar{y} 是本文的有限元解. 取 $\psi = A/\lambda$, 用以表示不同尺寸模型, N

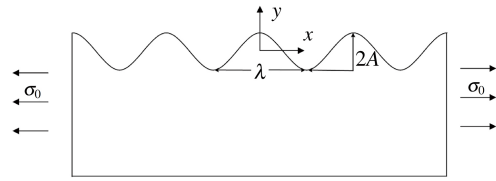


图 3 具有余弦状表面的弹性体

Fig.3 A solid with a cosine surface profile

表示程序运行的时间步数.

由于本文所研究的系统应力场变化相对于微结构表面形貌演化的速度慢很多, 即不必微结构表面形貌每更新一次便计算一次应力场. 为保证计算的速度和精确度, 本文微结构形貌更新每隔 ΔN 步后才计算一次应力场. 图 4 给出了不同 ΔN 下误差随时间步数的变化. 可以看到, 误差随着时间步数的增加呈收敛趋势, 且收敛数值小于 3%. 由图可知, 本文取 $\Delta N = 50$ 时可同时保证程序运算的精确度和速度.

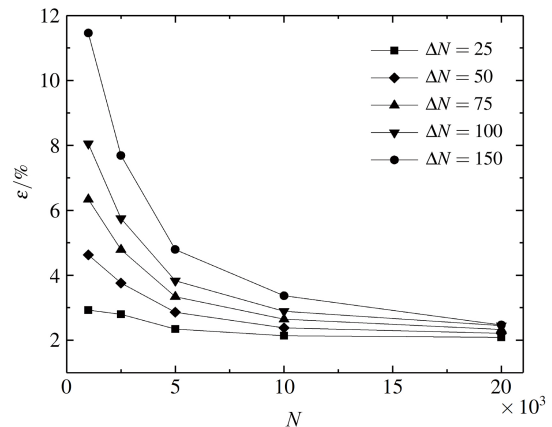


图 4 $\psi = 0.001$ 时, 不同 ΔN 下误差随时间步数的变化

Fig.4 The error as a function of the time step for different ΔN and

$\psi = 0.001$

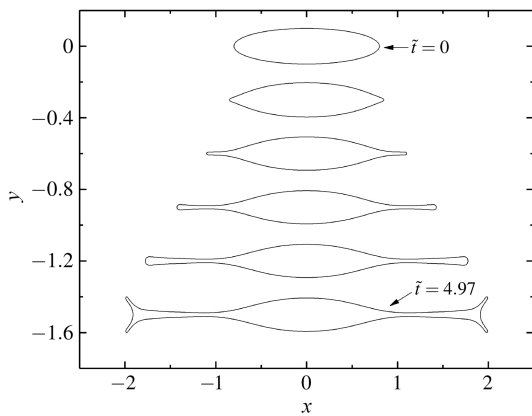
3 数值计算与讨论

本文取铜作为研究材料, 选取外载为双向等值拉应力 ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma$) 这一情况进行计算, 且不考虑化学势差的影响, 即取 Δg 为 0. 为方便, 采用无量纲化参数 $\tilde{\sigma} = \sigma h_0 / \gamma_s$, $\tilde{h} = h/h_0$, $\tilde{t} = t D \gamma_s / h_0^2$. 为描述晶内孔洞面积变化, 定义面积变化率 $\Delta S = (S - S_0) / S_0 \times 100\%$, 其中 S 表示孔洞当前时刻面积, S_0 表示孔洞初始时刻面积. 下面详细探讨应力 $\tilde{\sigma}$ 、形态比 β 及线宽 \tilde{h} 对晶内孔洞演化的影响.

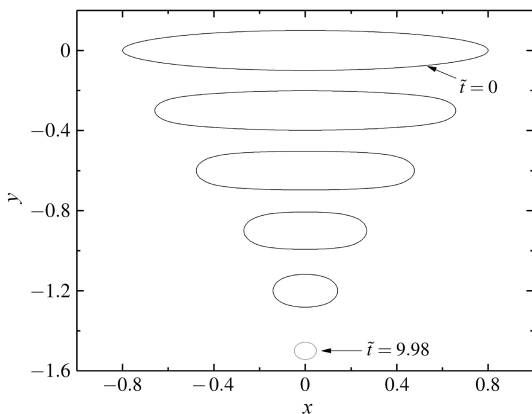
3.1 应力对晶内孔洞演化的影响

图 5 给出了不同条件下晶内孔洞的演化图. 由图 5(a) 和图 5(b) 可见, 当 $\bar{\sigma} = 20$ 时, 由于界面迁移驱动力 $p = -\gamma_s \kappa - w(\Delta g = 0)$ 小于零、应变能密度在界面迁移驱动力中占优, 晶粒收缩, 孔洞表面往固体方向运动, 即孔洞长大. 而表面的法向速度 v_n 与驱动力 p 成正比 (见式 (2)), 由于孔洞长轴尖端处的应变能密度远远大于其他区域的应变能密度, 因此晶内孔洞沿长轴方向快速扩张 (见图 5(a)). 当 $\bar{\sigma} = 15$ 时, 由于界面迁移驱动力大于零、表面能占优, 晶粒长大, 表面向着孔洞中心运动, 即孔洞面积收缩. 且由于此时表面能占优, 故晶内孔洞在表面能作用下不断缩小的同时趋于圆形 (见图 5(b)). 由上分析可见, 在其他参数不变时, 随着应力 $\bar{\sigma}$ 的改变, 晶内孔洞存在生长和收缩两种演化分叉趋势, 且存在一个临界应力值 $\bar{\sigma}_c$; 当 $\bar{\sigma} \geq \bar{\sigma}_c$ 时, 晶内孔洞在长轴方向生长; 反之, 晶内孔洞收缩并圆柱化.

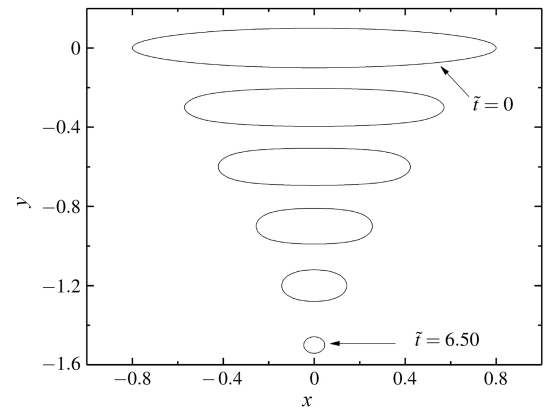
图 6 给出了初始形态比 β 不同下晶内孔洞演化生长的临界应力 $\bar{\sigma}_c$ 与线宽 \bar{h} 的关系. 由图可知, 由于线宽直接影响系统的应变能场, 随着线宽增大, 表



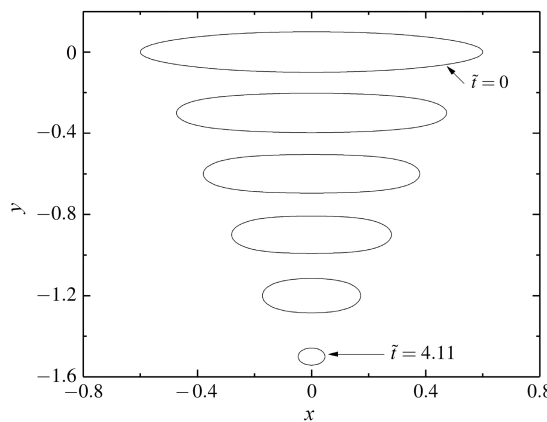
(a) $\beta = 8, \bar{\sigma} = 20, \bar{h} = 40$



(b) $\beta = 8, \bar{\sigma} = 15, \bar{h} = 40$



(c) $\beta = 8, \bar{\sigma} = 20, \bar{h} = 50$



(d) $\beta = 6, \bar{\sigma} = 20, \bar{h} = 40$

图 5 晶内孔洞演化图

Fig.5 The evolution of intragranular voids

面能逐渐占优, 从而导致 $\bar{\sigma}_c$ 增大. 即同一形态比下, 线宽较小的孔洞更容易长大. 而当线宽较小时, 应变能占优, 临界应力受其影响较大, 变化较快, 此时需特别关注线宽变化对晶内孔洞生长的影响. 在线宽较大时, 临界应力受其影响较小, 曲线变化趋于

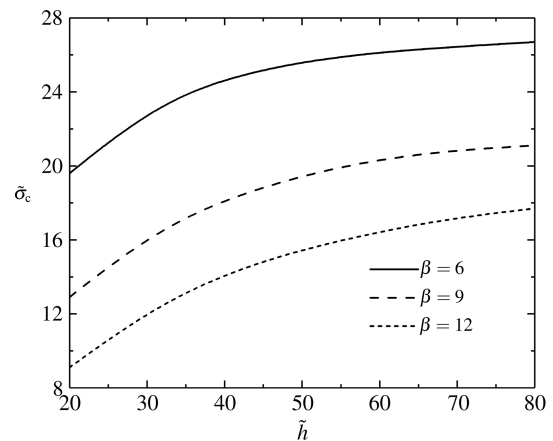
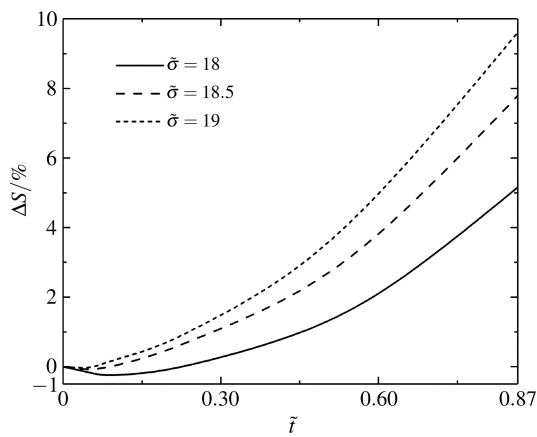


图 6 临界应力 $\bar{\sigma}_c$ 随线宽的变化

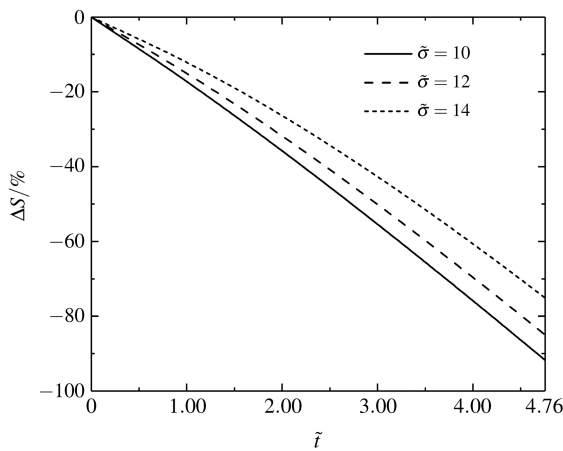
Fig.6 The critical value of the stress $\bar{\sigma}_c$ as a function of the linewidth

平缓, 且当线宽 $\tilde{h} > 70$ 时, 可认为线宽变化对晶内孔洞长大的影响可以忽略不计.

图 7 给出了不同应力下孔洞面积变化率 ΔS 随时间 \tilde{t} 的变化. 由图 7(a) 可知, 在晶内孔洞演化初期的短时间内可能会出现面积减小现象, 而后面积迅速增大; 且应力越小, 面积缩小越明显. 这是因为在 $\tilde{\sigma}$ 较小时孔洞演化前期的表面能占据优势, 晶粒长大, 孔洞收缩; 当孔洞形貌发生一定改变后, 应变能逐渐占据优势, 并一直主导孔洞演化, 促使孔洞长大. 当应力增大到一定程度 ($\tilde{\sigma} \geq 18.5$) 时, 应变能始终占优势, 所以未出现面积减小现象. 从曲线上升趋势还可看到, 应力越大, 晶内孔洞生长时面积增大越快. 由图 7(b) 可知, 当晶内孔洞收缩时, 面积减小非常显著; 且应力越小, 面积减小越快, 更有助于晶内孔洞收缩愈合.



(a) 孔洞生长时面积变化
(a) The change of the area when the voids grow



(b) 孔洞收缩时面积变化
(b) The change of the area when the voids shrink

图 7 $\beta = 9, \tilde{h} = 32$ 时面积变化率随时间的变化

Fig.7 The area change as a function of time for $\beta = 9, \tilde{h} = 32$

3.2 线宽对晶内孔洞演化的影响

图 5(a) 和图 5(c) 给出了 $\tilde{h} = 40$ 和 $\tilde{h} = 50$ 时晶内孔洞的演化. 由图可见, 当 $\tilde{h} = 40$ 时, 由于应变能密度在界面迁移驱动力中占优, 孔洞长大. 当 $\tilde{h} = 50$ 时, 由于表面能占优, 晶粒长大, 孔洞面积收缩并趋于圆形. 同上, 当其他参数不变时, 随着线宽的改变, 孔洞存在生长和收缩两种演化趋势, 且存在一个临界线宽 \tilde{h}_c ; 当 $\tilde{h} \leq \tilde{h}_c$ 时, 晶内孔洞在长轴方向长大; 反之, 晶内孔洞收缩并圆柱化.

图 8 给出了初始应力 $\tilde{\sigma}$ 不同下晶内孔洞生长的临界线宽 \tilde{h}_c 随形态比 β 的变化. 由图可知, \tilde{h}_c 随着形态比增大而增大, 即同一应力下, 形态比较大的晶内孔洞更容易长大. 在形态比较大时, 应力对临界形态比的影响更为明显, 且孔洞生长的临界线宽随着应力的增大而增大. 在有限元模拟中还发现, 当应力增大到一定值时, 无论线宽如何变化, 对于同一形态比的晶内孔洞都会长大. 这是因为线宽很大时, 其对孔洞表面的应力大小及分布的影响可忽略不计.

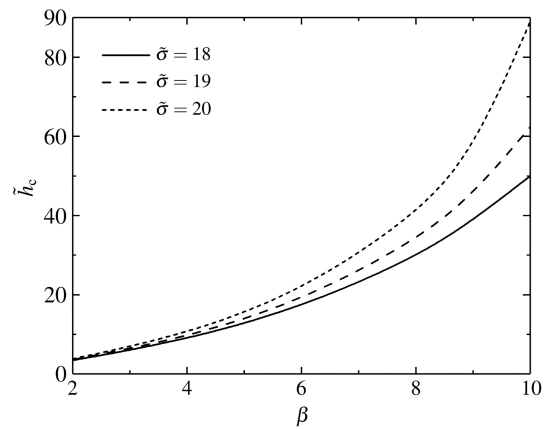


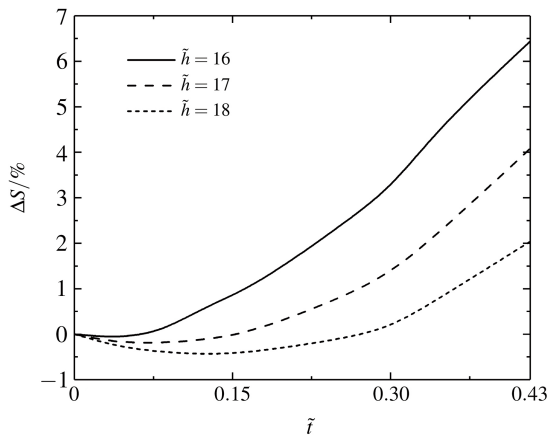
图 8 临界线宽 \tilde{h}_c 和 β 的关系

Fig.8 The critical value of the linewidth \tilde{h}_c as a function of β

图 9 给出了不同线宽下 ΔS 随时间的变化. 由图可知, 晶内孔洞生长时, 面积总体呈增大趋势. 当 $\tilde{h} > 16$ 时, 在晶内孔洞演化初期的短时间内由于表面能暂时占优, 孔洞面积会出现减小现象, 而后由于应变能逐渐占优导致孔洞面积增大; 且线宽越小, 面积增大越快. 而晶内孔洞缩小时, 线宽越大, 面积减小越快, 有助于晶内孔洞收缩愈合.

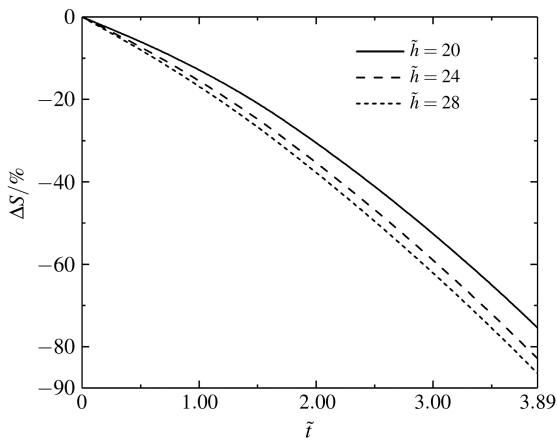
3.3 形态比对晶内孔洞演化的影响

图 5(a) 和图 5(d) 给出了 $\beta = 8$ 和 $\beta = 6$ 时晶内



(a) 孔洞生长时面积变化

(a) The change of the area when the voids grow



(b) 孔洞收缩时面积变化

(b) The change of the area when the voids shrink

图 9 $\beta = 6, \bar{\sigma} = 20$ 时面积变化随时间的变化

Fig.9 The area change as a function of time for $\beta = 6, \bar{\sigma} = 20$

孔洞的演化图. 由图可见, 当 $\beta = 8$ 时, 由于应变能密度在界面迁移驱动力中占优, 孔洞长大. 当 $\beta = 6$ 时, 由于表面能占优, 晶粒长大, 孔洞面积收缩并趋于圆形. 同上, 在应力和线宽不变而仅改变形态比时, 晶内孔洞也出现生长和收缩两种演化分叉趋势, 且存在一个临界形态比 β_c ; 当 $\beta \geq \beta_c$ 时, 晶内孔洞在长轴方向长大; 反之, 晶内孔洞收缩并圆柱化.

图 10 给出了初始线宽 \bar{h} 不同下晶内孔洞生长的临界形态比 β_c 随应力 $\bar{\sigma}$ 的变化. 由图可见, β_c 随应力增大而减小, 即同一线宽下, 受应力较大的晶内孔洞更易发生扩展. 此外还可看到, 应力较小时, 线宽的变化能显著改变系统的应变能场, 从而显著影响晶内孔洞的演化. 当线宽较大时, 由于表面能占优, 而增大形态比有助于增大应变能, 因而线宽较大的晶内微孔洞扩展所需的临界形态比较大.

图 11 给出了不同形态比下孔洞面积随时间的

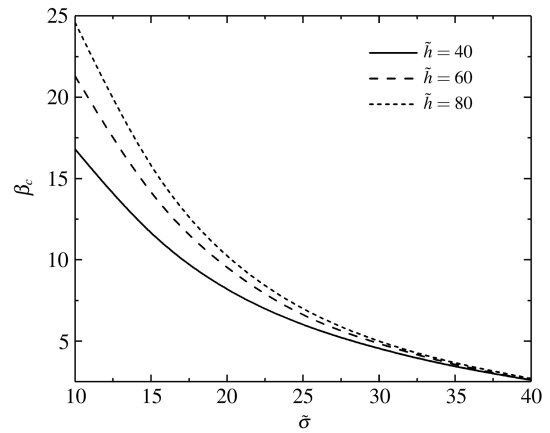
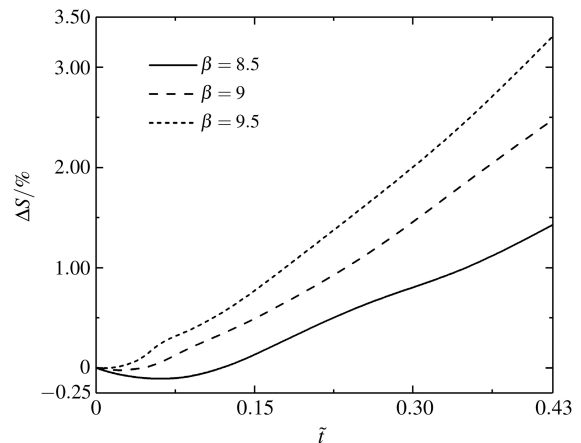


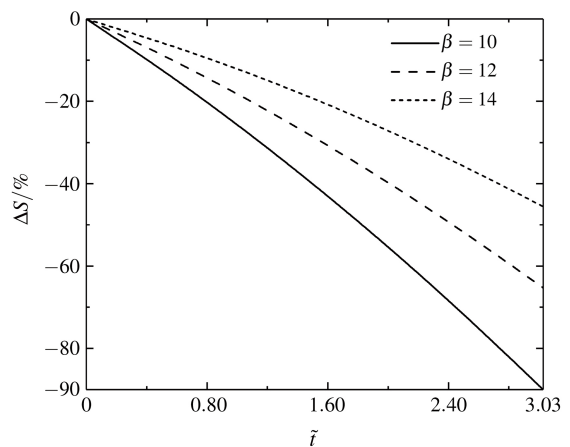
图 10 临界形态比 β_c 和 $\bar{\sigma}$ 的关系

Fig.10 The critical value of the aspect ratio β_c as a function of $\bar{\sigma}$



(a) 孔洞生长时面积变化

(a) The change of the area when the voids grow



(b) 孔洞收缩时面积变化

(b) The change of the area when the voids shrink

图 11 $\bar{\sigma} = 20, \bar{h} = 40$ 时面积变化随时间的变化

Fig.11 The area change as a function of time for $\bar{\sigma} = 20, \bar{h} = 40$

变化. 由图 11(a) 可见, 晶内孔洞面积总体呈增大趋势. 当 $\beta > 9$ 时, 在晶内孔洞演化初期的短时间内由于表面能暂时占优, 会出现孔洞面积减小现象. 而后应变能逐渐占优并导致孔洞面积增大; 且形态比越小, 面积减小现象越明显. 从曲线上升趋势还可看到, 形态比越大, 晶内孔洞生长时面积增大越快. 由图 11(b) 可知, 晶内孔洞收缩时, 形态比越小, 面积减小越快, 有助于孔洞收缩愈合.

4 结论

本文基于界面迁移下微结构演化的弱解描述, 建立应力诱发界面迁移下的有限单元法, 对内连导线中晶内孔洞的演化进行了模拟, 详细讨论了应力、线宽和形态比对晶内孔洞演化的影响, 得到以下结果:

(1) 晶内孔洞存在孔洞生长和收缩两种演化趋势.

(2) 若给定 β 和 \tilde{h} , 存在一个临界应力 $\tilde{\sigma}_c$. 当 $\tilde{\sigma} \geq \tilde{\sigma}_c$ 时, 晶内孔洞将会沿长轴方向长大; 当 $\tilde{\sigma} < \tilde{\sigma}_c$ 时, 晶内孔洞将会收缩并圆柱化.

(3) 若给定 β 和 $\tilde{\sigma}$, 存在一个临界线宽 \tilde{h}_c . 当 $\tilde{h} \leq \tilde{h}_c$ 时, 晶内孔洞将会沿长轴方向长大; 当 $\tilde{h} > \tilde{h}_c$ 时, 晶内孔洞将收缩并圆柱化.

(4) 若给定 $\tilde{\sigma}$ 和 \tilde{h} , 存在一个临界形态比 β_c . 当 $\beta \geq \beta_c$ 时, 晶内孔洞将会沿长轴方向长大; 当 $\beta < \beta_c$ 时, 晶内孔洞将会收缩并圆柱化.

(5) $\tilde{\sigma}$ 越大, \tilde{h} 越小, β 越大, 晶内孔洞越易发生生长, 且孔洞面积增大速度越快.

(6) $\tilde{\sigma}$ 越小, \tilde{h} 越大, β 越小, 晶内孔洞越易发生收缩, 且孔洞面积减小速度越快.

参 考 文 献

- 付云伟, 张龙, 倪新华等. 考虑夹杂相互作用的复合陶瓷夹杂界面的断裂分析. 力学学报, 2016, 48(1): 154-162 (Fu Yunwei, Zhang Long, Ni Xinhua, et al. Interface cracking analysis with inclusion interaction in composite ceramic. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(1): 154-162 (in Chinese))
- Liu Z, Yu H. A numerical study on the effect of mobilities and initial profile in thin film morphology evolution. *Thin Solid Films*, 2006, 513(1): 391-8
- 耿亚南, 蔡宗熙. 内压载荷作用下薄膜椭球的稳定性分析. 力学学报, 2016, 48(5): 1343-1352 (Geng Yanan, Cai Zongxi. Stability of a pressurized ellipsoidal balloon. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(5): 1343-1352 (in Chinese))
- Xia L, Bower AF, Suo Z, et al. A finite element analysis of the motion and evolution of voids due to strain and electromigration induced surface diffusion. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, 1997, 45(9): 1473-1493
- 熊骏, 李振环, 朱亚新等. 基于微结构动态演化机制的单晶镍基高温合金晶体塑性本构及其有限元模拟. 力学学报, 2017, 49(4): 763-781 (Xiong Jun, Li Zhenhuan, Zhu Yaxin, et al. Microstructure evolution mechanism based crystal-plasticity constitutive model for nickel-based superalloy and its finite element simulation. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(4): 763-781 (in Chinese))
- 吴丰顺, 张金松, 吴懿平等. 集成电路互连引线电迁移的研究进展. 半导体技术, 2004, 29(9): 15-21 (Wu Fengshun, Zhang Jinsong, Wu Yiping, et al. Progress of electromigration in IC interconnect metallic line. *Semiconductor Technology*, 2004, 29(9): 15-21 (in Chinese))
- Suzuki T, Nakamura T, Mizushima Y, et al. Stress migration phenomenon in narrow copper interconnects. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(4): 753
- Ho PS. Motion of inclusion induced by a direct current and a temperature gradient. *Journal of Applied Physics*, 1970, 41(1): 64-68
- Ho PS, Kwok T. Electromigration in metals. *Reports on Progress in Physics*, 1989, 52(3): 301
- 张金松, 吴懿平, 王永国等. 集成电路微互连结构中的热迁移. 物理学报, 2010, 59(6): 4395-4402 (Zhang Jinsong, Wu Yiping, Wang Yongguo, et al. Thermomigration in micro interconnects in integrated circuits. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(6): 4395-4402 (in Chinese))
- 郭佳惠, 祝六花. 关于超大规模集成电路制造中的应力迁移问题. 电子器件, 2000, 23(4): 262-266 (Guo Jiahui, Zhu Lihua. The problem about stress migration in the VLSI manufacture. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2000, 23(4): 262-266 (in Chinese))
- Gan ZH, Shao W, Mhaisalkar SG, et al. Experimental and numerical studies of stress migration in Cu interconnects embedded in different dielectrics. *AIP Conference Proceedings*, 2006, 817(817): 269-274
- 刘晴, 徐凯宇. 考虑应变能密度的铜互连导线电迁移应力分析. 力学季刊, 2017(2): 359-368 (Liu Qing, Xu Kaiyu. Electromigration stress analysis of copper. *Chinese Quarterly of Mechanics*, 2017(2): 359-368 (in Chinese))
- Dong X, Li Z. An analytical solution for motion of an elliptical void under gradient stress field. *Applied Physics Letters*, 2009, 94, 071909
- Wang Y, Yao Y. A theoretical analysis of the electromigration-induced void morphological evolution under high current density. *Acta Mechanica Sinica*, 2017, 33: 868-878
- Huang Q, Lilley CM, Divan R. An in situ investigation of electromigration in Cu nanowires. *Nanotechnology*, 2009, 20(7): 075706
- Maniatty AM, Ni J, Liu Y, et al. Effect of microstructure on electromigration-induced stress. *Journal of Applied Mechanics*, 2016, 83(1): 13-13
- Lin SK, Liu YC, Chiu SJ, et al. The electromigration effect revisited: Non-uniform local tensile stress-driven diffusion. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 3082

- 19 Wang H, Li ZH, Sun J. Effects of stress and temperature gradients on the evolution of void in metal interconnects driven by electric current and mechanical stress. *Modelling & Simulation in Materials Science & Engineering*, 2006, 14(4): 607
- 20 He DN, Huang PZ. A finite-element analysis of intragranular microcracks in metal interconnects due to surface diffusion induced by stress migration. *Computational Materials Science*, 2014, 87: 65-71
- 21 He DN, Huang PZ. A finite-element analysis of in-grain microcracks caused by surface diffusion induced by electromigration. *International Journal of Solids & Structures*, 2015, 62: 248-255
- 22 杜杰锋, 黄佩珍. 电迁移诱发表面扩散下沿晶微裂纹的演化. 固体力学学报, 2017, 38(1): 39-46 (Du Jiefeng, Huang Peizhen. The evolution of intergranular microcracks due to surface diffusion induced by electromigration. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2017, 38(1): 39-46 (in Chinese))
- 23 Suo Z. Motions of microscopic surfaces in materials. *Advances in Applied Mechanics*, 1997, 33(8): 193-294
- 24 Sun B, Suo Z, Yang W. A finite element method for simulating interface motion—I. Migration of phase and grain boundaries. *Acta Materialia*, 1997, 45(5): 1907-1915
- 25 Herring C. Surface tension as a motivation for sintering//Fundamental Contributions to the Continuum Theory of Evolving Phase Interfaces in Solids. Berlin, Heidelberg: Springer 1999: 33-69
- 26 Mullins WW. Theory of thermal grooving. *Journal of Applied Physics*, 1957, 28(3): 333-339
- 27 Prevost JH, Baker TJ, Liang J, et al. A finite element method for stress-assisted surface reaction and delayed fracture. *International Journal of Solids & Structures*, 2001, 38(30-31): 5185-203
- 28 Huang JM, Yang W. Three-dimensional evolution of interfaces under evaporation-condensation kinetics: A finite-element simulation. *Modelling & Simulation in Materials Science & Engineering*, 1999, 7(1): 87
- 29 Yu H. Crack nucleation from a single notch caused by stress-dependent surface reactions. *International Journal of Solids & Structures*, 2005, 42(13): 3852-3866
- 30 Huang PZ Sun J, Li ZH. Evolution of penny-shaped microcracks by interface migration. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40(8): 1959-1972
- 31 Huang PZ, Sun J, Li ZH. Axisymmetric finite-element simulation of grain growth behaviour. *Modelling & Simulation in Materials Science & Engineering*, 2002, 11(1): 41
- 32 Srolovitz DJ. On the stability of surfaces of stressed solids. *Acta Metallurgica*, 1989, 37(2): 621-625