

薄膜-基鈹系統之應力分析(I)

計劃編號: NSC90-2212-E-002-161

執行期限: 90年8月1日至91年7月31日

主持人: 陳兆勛 國立臺灣大學應用力學研究所教授

一、中文摘要:

隨著 ULSIC's (Ultra-Large-Scale Integrated Circuits) 技術的進步, 半導體元件已進入次微米 (Sub-Micron) 時代, 其中鋁金屬載線 (Interconnect) 廣泛使用於元件結構因此載線的可靠度對於產品元件壽命有很大的影響。在過去的文獻及實驗中發現, 鋁金屬載線元件於高溫下受到大電流熱應力的交互作用下, 載線內部的原子會因為能量的變化而產生擴散飄移的現象。若此時載線內部存在一自然缺陷孔洞 (Defect), 則孔洞會因其表面原子擴散造成孔洞形變, 進一步產生裂縫尖端一旦裂縫尖端的應力超過臨界值, 鋁金屬載線會因孔洞裂縫的快速劈裂而破壞, 甚至切斷載線, 形成斷路 (Open Failure), 失去原有的元件功能。本文根據 Wang[4] 的擴散理論, 並加入 Wu[28] 對於化學能的修正項, 假設載線材料為線彈性材料, 且僅限分布於孔洞表面的原子參與擴散機制。孔洞變形過程時會引起表面能 (Surface Energy) 與彈性能 (Elastic Energy) 變化, 將能量變化改變量相比較, 若以表面能變化為主, 孔洞變形會達到一平衡狀態, 形狀為橢圓型; 若以彈性能變化為主, 孔洞變形將無法達到平衡狀態。

利用保角映射法 (Conformal Mapping Method) 以一解析級數描述孔洞形狀, 再以對應的級數係數變化來表示孔洞形狀的動態變形過程。此外, 利用彈性力學中 Muskhelishvili [29] 提出的複變方法 (Complex Variable Method), 可求得孔洞表面的應力場與位移場分佈。

將統御方程式導入伽達金法 (Galerkin Approximation Method), 計算鋁金屬載線中孔洞幾何外形的動態變形過程, 以瞭解能量變化對於孔洞幾何外形平衡的影響。此外, 對於孔洞動態變形過程時, 其幾何外形比例變化、孔洞表面應力集中值分佈情況等問題, 也將一併討論之。

英文摘要:

Semi-conductor industry has entered sub-micro age with the progress of ULSI's technology. Since aluminum interconnects are widely applied to semi-conductor devices, its reliability has great influence on lifetime of product devices. From the past references and experiments, we found that as devices with aluminum interconnects are affected by the interaction of intense electric current and thermal stress at high temperature, energy variation will bring about atomic diffusion inside aluminum interconnects. In the meanwhile, if there is a defect inside the aluminum interconnect, pore shape change and then crack tips will be forming due to atomic diffusion on the surface of the void. As soon as stress of crack tips exceeds the threshold, aluminum interconnects will be broken and even cut off as a result of fast fracture of crack tips, which will form open failure and defunction devices. According to Surface Diffusion Model from Wang[4], we modify correlation of chemical potential from Wu[28] and propose the hypothesis that interconnects are made of linear elastic material and diffusion only take places on atoms distributing on the surface of voids. And we found that surface energy and elastic energy will vary during the process of pore shape change. If surface energy variation dominates, pore shape change will reach equilibrium, but if elastic energy variation dominates, pore shape change will not reach equilibrium.

We apply the Conformal Mapping Method to describe pore shapes by using analytical series. And here the corresponding coefficients of power

series vary will indicate the process of dynamic evolution of pore shape. Beside, the stress field and displacement field around the pore can be acquired by Complex Variable Method in elasticity. We substitute governing equation for Galerkin Approximation Method to calculate the process of dynamic evolution of pore shape, and observe how these values of energy variation relate to the geometry of pore shape. Furthermore, the stress concentration factors distribution on the pore surface will also be discussed.

二、計劃緣由與目的:

隨著半導體產業的蓬勃發展，ULSIC's (Ultra-Large-Scale Integrated Circuits) 技術快速地進步，今日我們可將數百萬個元件 (Device) 以半導體製程技術製作於單一晶片上。其中鋁金屬導線 (Aluminum Interconnect) [51] 廣泛地使用在各種不同的元件中，作為電流訊號的傳導線。導線的線寬也進入次微米 (Sub-Micron) 階段，由目前的 $0.13\ \mu\text{m}$ 朝向更微細化及高密度化發展，任何一條導線的損壞，即可能造成元件的故障。因此導線的可靠度 (Reliability) 就成了一個很重要的關鍵，可直接影響元件的壽命 (Lifetime)。

IC (Integrated Circuit) 中的金屬導線，成分通常由鋁合金 (Aluminum Alloy) 或是純銅 (Copper) 組成。一般而言，導線的長度為 $1\ \mu\text{m}$ ，寬度為 $0.5\ \mu\text{m}$ ，剖面形狀為長方形，以一種類似竹節 (Bamboo Grain Structure) 狀的晶體結構組成，圖 1.1 為典型金屬導線示意圖 (Fridline[1]與 Bhate [2])。由圖可知鋁金屬導線附著在基板 (Substrate)，外層再覆蓋惰性的絕緣層 (Passivating Dielectric Layer)，例如 SiO_2 、 SiN_x 或其他一些低電容 (Low Capacitance) 材料，以防止導線間彼此的訊號干擾 (Cross-Talk)。

從上述幾點可知，在大電流熱應力及高溫的交互作用下，會驅使導線孔洞表面的原子移動擴散，導致孔洞在導線內移動變形，由初始的圓形孔洞變形成狹長形的裂縫 (Slit)，甚至切斷導線，造成訊號中斷，影響十分嚴重。對純鋁

來說，彈性係數約為 70GPa ，降服強度約為 20MPa ，熔點為 933K 。

由上述可知，過去 30 年來導線線寬已縮小 $1/350$ 倍，隨著晶片中包含的電晶體數目逐年倍增，以及晶片體積的縮小化趨勢，擔任電流訊息傳遞的導線，其線寬勢必朝向更細微尺寸發展。因此，如何針對導線發展一合適的物理模型機制 (Physical Model)，來尋找影響金屬導線中孔洞形狀穩定性 (Stability) 的關鍵因素，以及金屬載線中孔洞表面的應力集中值大小，並且有效地預測導線的使用壽命與孔洞形狀的動態變形過程，就成了分析有關微電子元件中金屬導線可靠度時重要的議題。上述問題除了能作為設計時的重要參考依據，也是我們挑選這個题目的動機。

三、研究方法及進行步驟

本研究重點在於研究鋁金屬導線在無電流作用下 (亦即忽略電致遷移效應)，考慮導線受到殘留應力作用時，孔洞幾何外形的動態變形過程與表面應力集中值分佈的情形。換言之，針對「圓形孔洞如何變形成狹長型的裂縫，並切斷導線」的問題，來研究分析。

我們採用 Asaro 與 Tiller[23]-Wang[4] 與 Suo et al.[26] 的模型方法，假設孔洞的原子擴散方式以表面擴散為主，忽略其餘的原子擴散方式，計算孔洞幾何外形的動態變形過程與表面應力集中值分佈的情形。並加入 Wu[28] 對於化學能的修正項，討論其對於孔洞幾何外形平衡的影響。本文的討論是以二維尺度問題 (Two-Dimensional Problem) 的分析為主，

利用 Muskhelishvili [29] 提出之複變方法來處理彈性力學的平面問題。首先以含有未定係數的解析函數來描述導線中孔洞周圍的應力場分佈 (Stress Field Distribution)，再使用複變中的保角映射法 (Conformal Mapping Method)，將孔洞的幾何形狀以一對應的解析級數係數表示之。利用得到的級數係數集合與孔洞的邊界條件，來求解上述含有未定係數

的解析函數，以求得孔洞周圍應力場位移場 (Displacement Field) 與力場 (Resultant Force) 分佈，並計算孔洞的表面能與彈性能大小。採用 Wang[4] 的表面原子擴散理論模型基礎，介紹孔洞的運動學 (Kinematics)、力動學 (Kinetics)、能量學 (Energetics) 等三個模型。首先以質量守恆觀點來描述孔洞表面的原子擴散量與孔洞邊界變形速度的關連性，並利用虛運動 (Virtual Motion) 定義孔洞表面的原子擴散驅動力，以及建立微觀的原子受力大小與巨觀的系統總自由能增減之間的關係，最後將孔洞變形問題以積分形式表示，導入數值模擬中計算。延續 Wang[4] 的表面原子擴散理論模型基礎，並加入 Wu[28] 對於化學能的修正項。首先證明 Wang[4] 與 Asaro&Tiller[23] 對於化學能定義的一致性，其次簡述並推導表面應力與孔洞幾何外形增生交互作用對化學能的修正。最後套用 Wu[28] 提出的化學能完整定義式，更改 Wang[4] 理論基礎中的孔洞的運動學、力動學、能量學等三個模型，將修正的結果同樣地以積分形式表示。將上述所推導出積分形式的統御方程式，導入伽達金法求解，將孔洞的動態變形過程轉換成一線性常微分聯立方程組。以求得孔洞幾何外形的動態變形過程，對於其幾何外形比例變化、孔洞表面應力集中值分佈情況等問題，亦獲得良好的答案。章節中除了詳述計算過程外，也針對數值計算結果加以解釋分析，以求得其所代表的物理意義，並應用在實際的問題上。

修正孔洞表面原子擴散模型

我們將以 Wu[28] 定義的化學能來修正 Wang[4] 於 1996 年提出的孔洞表面原子擴散模型。物體的總自由能變化量為

$$\begin{aligned} \delta \Pi &= -\delta \bar{\Pi} = - \int_{(\partial B)} \Psi \delta N_0 dL \\ &= - \int_{(\partial B)} \left[W - \Gamma K + \Sigma \frac{\partial \epsilon_{SS}}{\partial Y} - \frac{d}{dL} (2 \Sigma \epsilon_{SN}) \right] \Omega \cdot \delta N_0 dL \end{aligned}$$

在此，採用 Grinfeld[34] 的表面能線性模型，

$$\begin{aligned} \Gamma &= \sigma_0 + \Sigma_0 \Lambda \\ \text{表示如下} \quad &= (\sigma_0 + \Sigma_0) + \Sigma_0 (\Lambda - 1) \\ &= \Gamma_0 + \Sigma_0 (\Lambda - 1) \end{aligned}$$

其中， σ_0 與 Σ_0 為應力係數 (Stress Coefficient)。

$$\begin{aligned} \Sigma &= \frac{\partial \Gamma}{\partial \Lambda} = \frac{\partial}{\partial \Lambda} [\Gamma_0 + \Sigma_0 (\Lambda - 1)] \\ &= \Sigma_0 \end{aligned}$$

故 Σ_0 為殘留應力。又由 Wang[4] 假設 Γ_0 為定值 ($\Gamma_0 = 1 \text{ J/m}^2$)，Wu[35] 與 Chen[36] 表示 Σ_0

$$\text{與 } \Gamma_0 \text{ 存在一關係式 } \Sigma_0 = (1 - \nu) \Gamma_0$$

故殘留應力 Σ_0 亦為一定值。

系統的總自由能變化量為

$$\begin{aligned} \delta \Pi &= - \int_{(\partial B)} \left[W - (\Gamma_0 + \Sigma_0 \Lambda) K + \Sigma_0 \frac{\partial \epsilon_{SS}}{\partial Y} - \frac{d}{dL} (2 \Sigma_0 \epsilon_{SN}) \right] \Omega \cdot \delta N_0 dL \\ &= - \int_{(\partial B)} (W - \Gamma_0 K) \Omega \cdot \delta N_0 dL + \int_{(\partial B)} \left[\Sigma_0 \Lambda K - \Sigma_0 \frac{\partial \epsilon_{SS}}{\partial Y} + \frac{d}{dL} (2 \Sigma_0 \epsilon_{SN}) \right] \Omega \cdot \delta N_0 dL \\ &= \delta (U_S - U_E) + \int_{(\partial B)} \Sigma_0 \left(\Lambda K - \frac{\partial \epsilon_{SS}}{\partial Y} + 2 \frac{\partial \epsilon_{SN}}{\partial L} \right) \Omega \cdot \delta N_0 dL \end{aligned}$$

根據 Wu[28]，物體變形前曲率 k 與變形後曲率 K 存在一轉換關係

$$k = (1 - \epsilon_{NN}) K - \frac{\partial \epsilon_{SS}}{\partial Y} + 2 \frac{\partial \epsilon_{SN}}{\partial L}$$

$$\begin{aligned} \text{又} \quad \tau_{NN} &= \Sigma k = \Sigma_0 k \\ \Lambda &= \Lambda_{(s)}(L, 0) = 1 + \epsilon_{SS} \end{aligned}$$

因此，上式可進一步化簡為

$$\begin{aligned} \delta \Pi &= \delta (U_S - U_E) + \int_{(\partial B)} \Sigma_0 [(1 + \epsilon_{SS}) K + k - (1 - \epsilon_{NN}) K] \Omega \cdot \delta N_0 dL \\ &= \delta (U_S - U_E) + \int_{(\partial B)} \Sigma_0 [k + (\epsilon_{SS} + \epsilon_{NN}) K] \Omega \cdot \delta N_0 dL \\ &= \delta (U_S - U_E) + \int_{(\partial B)} [\tau_{NN} + \Sigma_0 (\epsilon_{SS} + \epsilon_{NN}) K] \Omega \cdot \delta N_0 dL \end{aligned}$$

因為應力 ($\tau_{SS}, \tau_{NN}, \tau_{SN}$) 與應變

($\epsilon_{SS}, \epsilon_{NN}, \epsilon_{SN}$) 滿足下列關係

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= \lambda \delta_{ij} \epsilon_{kk} + 2 \mu \epsilon_{ij} \\ \epsilon_{ij} &= \frac{1}{2\mu} \left(\tau_{ij} - \frac{\lambda}{3\lambda + 2\mu} \delta_{ij} \tau_{kk} \right) \end{aligned}$$

式中的 λ 與 μ 為材料的拉曼常數 (Lame Constant)。

$$\text{故 } \varepsilon_{SS} + \varepsilon_{NN} = \frac{\lambda + 2\mu}{2\mu(3\lambda + 2\mu)} (\tau_{SS} + \tau_{NN})$$

代入式

$$\begin{aligned} \delta\Pi &= \delta(U_S - U_E) + \int_{(\partial\Omega)} \left[\tau_{NN} + \frac{\Sigma_0(\lambda + 2\mu)}{2\mu(3\lambda + 2\mu)} (\tau_{SS} + \tau_{NN}) K \right] \Omega \cdot \delta N_n dL \\ &= \delta(U_S - U_E) + \int_{(\partial\Omega)} \left\{ \frac{\Sigma_0(\lambda + 2\mu)}{2\mu(3\lambda + 2\mu)} \tau_{SS} + \left[\frac{1}{K} + \frac{\Sigma_0(\lambda + 2\mu)}{2\mu(3\lambda + 2\mu)} \right] \tau_{NN} \right\} K \Omega \cdot \delta N_n dL \end{aligned}$$

$$\text{令 } C_1 \text{ 為一常數 } C_1 = \frac{\Sigma_0(\lambda + 2\mu)}{2\mu(3\lambda + 2\mu)}$$

因此，式可簡化為

$$\begin{aligned} \delta\Pi &= \delta(U_S - U_E) + \int_{(\partial\Omega)} \left\{ C_1 \tau_{SS} + \left[\frac{1}{K} + C_1 \right] \tau_{NN} \right\} K \delta r_n dL \\ &= \delta(U_S - U_E) + \delta f(\tau_{SS}, \tau_{NN}, K, \delta r_n) \\ &= \delta[U_S - U_E + f(a_i)] \end{aligned}$$

因為 U_S U_E 與 τ_{SS} τ_{NN} K δr_n ($\delta r_n = \delta H$)

皆為保角映射級數係數 $\{a_i\}$ 的函數。故式即為

加入表面應力效應後的系統總自由能變化量表示式，符合我們的預期可利用無因次化，將上式代入程式中計算。

四、結果與討論與未來展望

針對微電子元件中鋁金屬導線於高溫下受製程造成的殘留應力，其對於導線內部孔洞幾何形狀的影響，經由保角映射法與彈性力學中複變數解應力函數的方法配合下，對於無限域上之孔洞的幾何外形與孔洞邊界上應力場位移場等問題，可獲得很好的答案。

再利用 Wang[4]提出的孔洞表面原子擴散模型，即可計算出孔洞幾何外形的動態變形過程與其對應的邊界應力場與位移場分佈。我們利用上述方法，檢驗了金屬導線於分別單軸和雙軸應力下的幾何外形變化與應力集中值分佈情形所得到的結果，與彈性力學中橢圓曲線孔洞的精確解有很好的一致性。

然而 Wang[4]理論的不足，在於其假設孔洞的表面能密度為定值，且忽略表面應力與邊界增生的交互影響效應。因此，需以 Wu[28]的化學能修正項以及 Grinfeld[34]的線性表面能密度模型加以修正，以期達到更真實的答案。

因此利用上述方法可詳細記錄孔洞每一瞬間的真實情況，有別於傳統的加速壽命試驗與統計分析，對於產品的設計與可靠度的評估有莫大的幫助。在本文中，已詳細推導了如何修正 Wang[4]的孔洞表面原子擴散模型之能量部分理論。展望未來，需將其套入程式中，並加入電致遷移的效應，以符合實際的元件工作情形。

五、參考文獻:

- [1] D. Fridline. "Finite element modeling of electromigration and stress voiding in microelectronic interconnects", BROWN UNIVERSITY, PhD Thesis, 2001.
- [2] D. Bhate. "Diffuse Interface Model of Void Growth and Migration in Microelectronic Interconnect Lines", BROWN UNIVERSITY, PhD Thesis, 2001.
- [3] W. Wang, and Z. Suo. "A simulation of electromigration-induced transgranular slits," J. Appl. Phys. 79, p2394-2403(1996).
- [4] W. Wang. "Simulation of transgranular slits in aluminum interconnects caused by thermal stress and electromigration", UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SANTA BARBARA, PhD Thesis, 1996.
- [5] C. H. Wu. "The Mechanics of Film-Substrate Systems", Presented at Tjing Ling Industrial Research Institute, National Taiwan University, November 1-3, 2000.
- [6] R. Gleixner, B. Clemens, and W. D. Nix, "Void nucleation in passivated interconnect lines: Effects of site geometries, interfaces and interface flaws," Journal of Materials Research, Vol.12(8), p2081-2090(1997).
- [7] J. E. Jr. Sanchez, V. Randle, O. Kraft, and E. Arzt, "Morphology and crystallography of electromigration induced transgranular slit failures in aluminum alloy interconnects," SPIE, Submicrometer Metallization, 1805, p222-231(1992).
- [8] J. H. Rose, "Fatal electromigration voids in narrow aluminum-copper interconnect," Appl. Phys. Lett. 61, p2170-2172(1992).
- [9] W. Wang, and Z. Suo. "Diffusive void bifurcation in stressed solid," J. Appl. Phys. 76(6), p3410-3421(1994).

- [10] Jacky, “超頻傷害 CPU 的真相大揭露”, 超頻者天堂技術網站, <http://www.overlocker.com.tw>。
- [11] A. Blech, and H. Sello, “A study of failure mechanisms in silicon planar epitaxial transistors,” *Physics of Failure in Electronics*, Vol.5p496(1966)
- [12] Z. Suo, W. Wang, and M. Yang. “Electromigration instability: Transgranular slits in interconnects,” *Appl.Phys.Lett.*64(15), 1944-1946(1994).
- [13] E. Arzt, O. Kraft, W. D. Nix, and J. E. Jr. Sanchez, “Electromigration failure by shape change of voids in bamboo lines,” *J. Appl. Phys.* 76(3), pp1563-1571(1994).
- [14] O. Kraft, and E. Arzt. “Numerical simulation of electromigration-induced shape changes of voids in bamboo lines,” *Appl. Phys. Lett.* 66(16), p2063-2065(1995).
- [15] 李守忠、李順益, 「恆溫電致遷移測試在晶圓式可靠性測試的應用」, 半導體科技網頁技術專文 (<http://www.sstpro.com.tw>), 民國 90 年 9 月。
- [16] R. J. Gleixner, and W. D. Nix. “A physically based model of electromigration and stress-induced void formation in microelectronic interconnects,” *J. Appl. Phys.* Vol.86, p1932-1944(1999).
- [17] Y. J. Park, V. K. Andleigh, and C. V. Thompsin, “Simulations of stress evolution and the current density scaling of electromigration-induced failure times in pure and alloyed interconnects,” *J. Appl. Phys.* Vol.85, p3546-3555(1999).
- [18] L. Xia, A. F. Bower, Z. Suo, and C. F. Shih. “A finite element analysis of the motion and evolution of voids due to strain and electromigration induced surface diffusion,” *J. Appl. Phys. Solids*, Vol.45, No 9, pp1473-1493(1997).
- [19] M. Occhionero, R. Adams, and K. Fennessy. “A new substrate for electronics packaging: Aluminum-Silicon Carbide (AlSiC) composites,” *Proceedings of the Forth Annual Portable by Design Conference, Electronics Design*, March 24-27, p398-403.
- [20] Korhonen, M., Paszkiet, C. and Li, C.-Y. “Mechanisms of thermal stress relaxation and stress induced voiding in narrow aluminum based metallizations,” *Journal of Applied Physics*, Vol.69, p8083(1991).
- [21] A. I. Sauter. “Modeling of thermal stresses and void growth processes in microelectronic interconnect structures,” STANFORD UNIVERSITY, PhD Thesis, 1991.
- [22] Tezaki, In *Twenty-eight Proceedings Reliability Physics(Electron Devices and Reliability Societies of IEEE)*, New York, p22(1990).
- [23] R. J. Asaro, and W. A. Tiller. “Interface morphology development during stress corrosion cracking: Part 1. Via surface diffusion,” *Metallurgical Transactions*, Vol. 3, p1789-1796(1972).
- [24] C. Herring. “Surface tension as a motivation for sintering,” *The Physics of Powder Metallurgy* (ed. W. E. Kingston), McGraw-Hill, New York, p143-179(1951).
- [25] A. I. Sauter, and W. D. Nix, “A study of stress-driven diffusive growth of voids in encapsulated interconnect lines,” *J. Mater. Res*, Vol.7(5), p1133-43(1992).
- [26] W. Wang, Z. Suo, and T.-H. Hao. “Transgranular slits in aluminum interconnects caused by thermal stress and electric current,” *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol.338, p415-420(1994).
- [27] W. Wang, and Z. Suo. “Shape change of a pore in a stressed solid via surface diffusion motivated by surface and elastic energy variation,” *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.45, No.5, p709-729(1997).
- [28] C.H. Wu. “The Chemical Potential for Stress-Driven Surface Diffusion,” *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.44, p2059-2077(1996).
- [29] N.I. Muskhelishvili, *Some Basic Problems of The Mathematical Theory of Elasticity*, P. Noordhoff, 1963.
- [30] 程昌鈞, *彈性力學*, 二版, 蘭州市, 蘭州大學出版社, 民國八十五年。
- [31] Larson, Hostetler, Edward, *Calculus*, Fifth Edition, Heath, 1994.
- [32] W. H. Press, *Numerical Recipes in C*, Second Edition, Cambridge University Press, 1997.
- [33] A. N. Norris. “The energy of a growing elastic surface,” *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 35,

p5237-5252(1998).

[34] M. A. Grinfeld. "Stress Corrosion and Stress Induced Surface Morphology of Epitaxial Films," Scanning Microscopy, Vol. 8, p869-882.(1994)

[35] C.H. Wu. "The effect of surface stress on the configurational equilibrium of voids and cracks," J. Mech. Phys. Solids, Vol.47, p2469-2492(1999).

[36] C. H. Wu, J. Hsu, and C.H. Chen. "The Effect of Surface Stress on the Stability of Surfaces of Stressed Solids," Acta Materialia, Vol.46, Issue 11, p3761-3766(1998).

[37] F. H. Wohlber, Diffusion and Defect Data-Solid State Data, Trans Tech Publications, Switzerland, Vol. 47, 1986.

[38] Intel® Pentium® 4 Processor in the 478-Pin Package at 1.40GHz, 1.50GHz, 1.60GHz, 1.70GHz, 1.80GHz, 1.90GHz, and 2GHz Datasheet, www.intel.com.

圖 1.4 典型的電致遷移現象破壞示意圖
(Jackky[10])



(b)

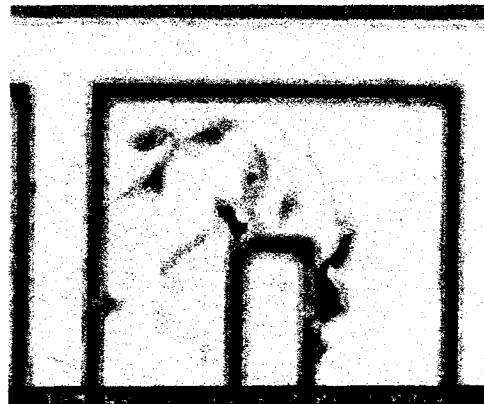
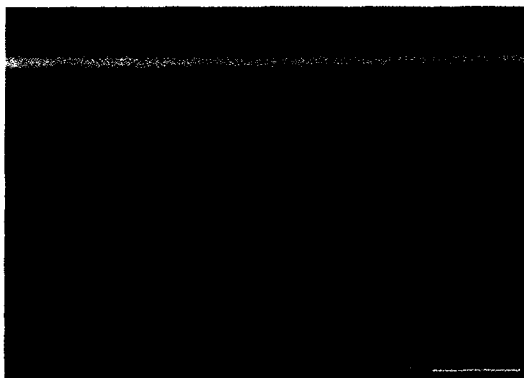


圖 1.5 掃描式電子顯微鏡拍攝導線結構裂縫示意圖 (李守忠、李順益[15])



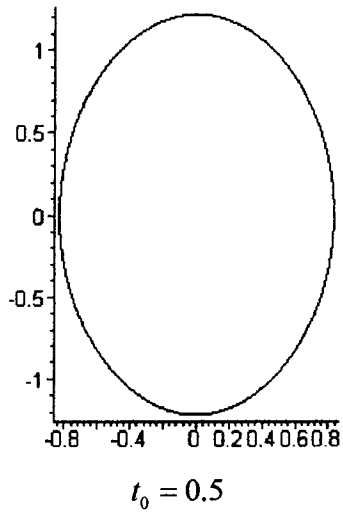
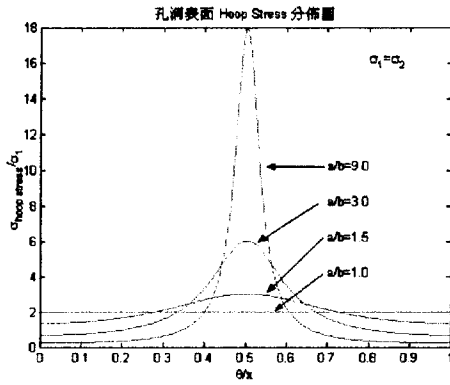
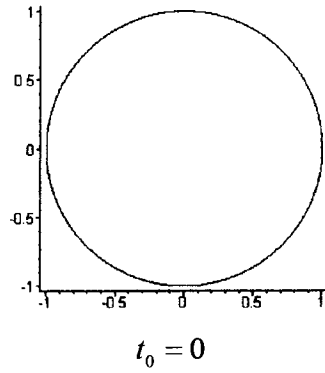
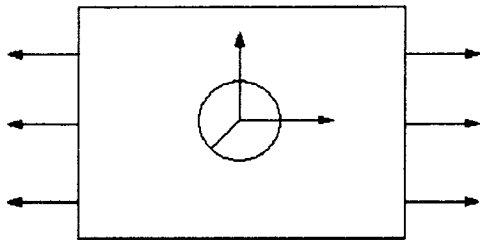


圖 5.7 雙軸應力下不同長寬比的橢圓形孔洞表面環向應力分佈示意圖

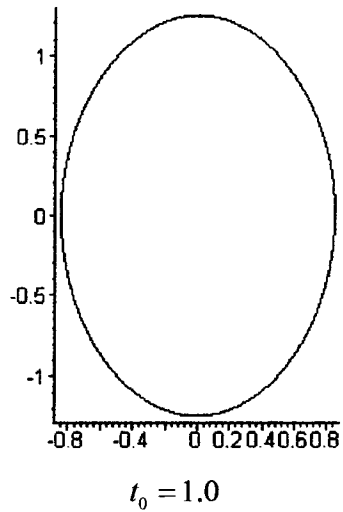


圖 5.8 單軸應力 ($\sigma_2/\sigma_1 = 0$) 下孔洞幾何外形的動態變化過程示意圖