

# Al/MSQ 金屬線的應力遷移

計畫編號：NSC 89-2215-E-007-014

執行期限：88 年 8 月 1 日至 89 年 7 月 31 日

主持人：葉鳳生 清華大學 電子所教授

## 一、中文摘要

本報告之目的在於研究鋁與 methylsesquioxane(MSQ)之製程整合。首先鍍製 MSQ，氮化鈦薄膜與鋁膜，配合不同介電層組合 (Al/TiN/MSQ/Si, Al/TiN/PEOXIDE/MSQ/Si and Al/TiN/oxygen treated MSQ/Si)製成樣品。以電容-電壓特性分析(C-V)、電流-電壓特性分析(I-V)分析熱穩定性。更進一步製作 damascene 結構的鋁線，在 175°C 加熱下，測量電阻值的變化，由薄膜應力與電阻的關係，了解應力遷移。

在 Al 與 MSQ 的熱穩定性方面，發現 oxygen treated 的 MSQ 有較高的熱穩定性，其可耐溫到 425°C；在外加熱應力對 damascene 結構鋁導線電阻之變化方面，線寬較小之鋁線電阻變化較大。

## 英文摘要

The integration of aluminum and methylsesquioxane(MSQ) are investigated. First, we fabricated MSQ, titanium nitride (TiN) and Al films with various combination of inter metal dielectric multilayer(Al/TiN/MSQ/Si, Al/TiN/PEOXIDE/MSQ/Si and Al/TiN/oxygen treated MSQ/Si).Furthermore,we patterned the Al line with with damascene structure and measured the changing of the resistance of Al under the temperature at 175°C to find out the correlation between the multilayer stress and resistance and understand stress migration.

Oxygen treated MSQ shows the best thermal stability among these multilayer, it can remain stable after 425°C annealing process. By applying thermal stress on the Al line with damascene structure, the change in resistance of the narrower line was larger.

## 二、計畫緣由與目的

當積體電路的元件尺寸縮小，內層金屬連線 (interconnect line) 的線寬及間距也隨著縮短。此時由於寄生電容(parasitic capacitance)所造成的訊號傳輸延遲(RC delay)將成為 ULSI 技術發展所需克服的問題[1]。為克服此問題，我們利用低介電材質來降低內層金屬連線中的電容值，進而降低傳輸延遲以增進元件工作效率。

在內層金屬連線製程中，我們用 Damascene 結構有以下的優點：(1)製程簡化(2)低花費，在 M.Igaradhi 的文章中提到 Damascene 結構是在 interlayer dielectric(ILD)

上做 pattern 形成 trench 或 via 結構，而不需蝕刻金屬，這將使得製程簡單而且可保持每一層的平坦性[2]。另外在每一層金屬連線的製作過程中，都會經過許多 thermal cycles，由於熱膨脹係數不同的原因，在經過 thermal cycles 後，不同的 layer 間會有應力造成的 void 產生，當線寬越來越小時，此種應力所造成的 void 是不容忽視的。在 T. Hosoda 所發表的期刊文章中 [3]，用四種樣品：pure Al, Al-0.1wt%Cu, Al-0.15wt%Ti 及 Al-0.1wt%Cu-0.15wt%Ti 觀察其 electromigration 和 stressmigration 的情形。在 stressmigration test 中，樣品放在 150°C 的溫度中加速 void 的產生，並週期性的量測電阻直至電阻無窮大也就是樣品 open failure 為止。在本報告中我們首先了解 Al, MSQ, TiN 多層薄膜配合之熱穩定性，再用 Al 配合 MSQ 以 Damascene 結構，在 thermal cycles 後，將樣品放在 175°C 的溫度中加速 stress。我們觀察在 thermal cycles 後所造成的 stress 對於金屬連線電阻的影響。

## 三、研究方法及成果

此部分以試樣之準備及量測分析說明。

### 3-1 試樣之準備

本篇報告樣品製作分為三個部分，第一個部分為鋁以 TiN 為 diffusion barrier 與 MSQ 的電容-電壓量測，第二部份為薄膜應力量測，第三部份為 MSQ 與鋁配合 damascene 結構觀察 stress 對鋁導線的影響。因此，我們將試樣的準備分為三個 Group：

Group A: Al /TiN/MSQ 電容-電壓量測的樣品

以 p-type, 晶相(100), 電阻率約 5~10Ω·cm 之矽晶片為基材，沉積 Al(2000Å)/LPCVD TiN(500Å)/MSQ(2200Å) or PEOXIDE(500)+MSQ(2200Å) or O<sub>2</sub> treated MSQ(2200Å)/Si multilayer, 分別為樣品 A-1, A-2, 及 A-3。

Group B: 薄膜應力量測之樣品

以 p-type, 晶相(100), 電阻率約 5~10Ω·cm 之矽晶片為基材，此矽晶片在 clean 完後先測殘餘應力，再製成 PEOXIDE(1000Å)/Al(5000Å)/LPCVD TiN(500Å) /MSQ(5000Å) or PEOXIDE(500)+ MSQ (5000Å) or O<sub>2</sub> treat MSQ(5000Å)/Si multilayer, 分別為樣品 B-1, B-2, B-3。

Group C: stress 對鋁導線的影響研究之樣品

以 p-type, 晶相(100), 電阻率約 5~10Ω·

cm 之矽晶片為基材，鋁以 TiN 為擴散障礙層與 MSQ 做成 damascene 結構，最後於導線上沉積一層 PECVD OXIDE 為 passivation 如圖 1。線長 510  $\mu\text{m}$ ，線寬有 1.8  $\mu\text{m}$ (C-1.8)及 2.4  $\mu\text{m}$ (C-2.4)兩種寬度，為樣品 C-1.8 及 C-2.4。

### 3-2 C-V 特性分析

使用 HP4294A 做高頻量測，頻率為 1MHz，對 Group A 試片，以高溫爐管 350°C、400°C、425°C 及 450°C 30 分鐘後，做高頻的 C-V 量測，見圖 2(a)，圖 2 (b)，圖 2 (c)。觀察樣品在不同溫度的電容-電壓曲線位移，藉以觀察 Al 與 MSQ 之熱穩定性。我們也知  $V_{FB} = \Phi_{ms} - Q_f / C_{ox}$ ，由  $\Delta V_{FB}$  之大小可了解 MSQ 中  $Q_f$  (fixed oxide charge) 之多寡，見表一。

由圖 2(a)觀察到溫度直到 425°C 時 Al 樣品電容-電壓曲線還往正偏壓移動，到了 450°C 時才往負偏壓移動，顯然 TiN 500A 於 pure MSQ 上能撐到 425°C 時阻擋住鋁的擴散，另外我們發現曲線的樣子變化，有可能是界面上的 interface trap 隨著溫度的變化造成。再來我們看 A-2 的電容-電壓曲線，如圖 2(b)，顯然的於 425°C 時電容-電壓曲線就往負偏壓移動，所以 TiN500A 於 PEOXIDE(500A)+MSQ 上能撐到 400°C 時阻擋住鋁的擴散。最後是 A-3 的電容-電壓曲線，如圖 2(c)，在 400°C、425°C 溫度時電容-電壓曲線幾乎重疊在一起，到 450°C 才有稍向負偏壓移動的情形，所以 A-3 有耐到 425°C 的熱穩定性。

由表一我們可以很明顯的得知， $V_{FB}$  隨退火溫度往正電壓位移大約 2~9V，此乃 annealing 的效應使得  $Q_f$  減少。直到溫度高到鋁的擴散能力相當強使得擴散障礙層擋不住時，鋁擴散進介電層為正電的 mobile ion 才使得  $V_{FB}$  往負電壓位移約 1V 左右。由表一我們發現 A-3 的  $Q_f$  最少，這可能由於此試片在未鍍鋁前有經過 O2 treatment 的高溫過程：在 300°C 通大量氧氣的爐管內 10 分鐘，有 annealing 效應使得  $Q_f$  減少，且 O2 treatment 後，表面形成薄氧化層約 150Å，見圖 3 XPS 分布圖。而有 PEOXIDE 的 A2 試樣，其  $Q_f$  都較大，這可能是在 PEOXIDE 沉積於 MSQ 上時，PEOXIDE 內含有較多的  $Q_f$ ，造成整個 PEOXIDE+MSQ 內有相當多的  $Q_f$ 。

### 3-3 電流-電壓特性分析

使用 HP4156 做電流-電壓量測。對 Group A 試片在高溫爐管 400°C 30 分鐘退火後做電流-電壓量測，再將其轉換成電流密度(J)對電位( $V^2$ )圖，見圖 4。圖中呈顯出三條直線可證明介電質導電的機制為 Space-charge-limited，

也發現當介電質中的  $Q_f$  多時其漏電電流會較大。

### 3-4 薄膜應力量測

用 Tencor FLX system 來量測沈積薄膜的應力。將 Group B 之試片 clean 後在未鍍膜前先量一次裸片的曲率半徑。在鍍完膜 sintering 完後再量一次曲率半徑，代入 Stoney equation，此時可得到鍍膜後的應力值。最後試片在 450°C，30 分鐘的 thermal cycle 一次後量其曲率半徑並得其應力值，藉以觀察不同的 multilayer 在 thermal cycle 後的應力變化，見表二。

由表二我們發現介電層只有 MSQ 的 B-1 在薄膜沉積後到 450°C 30 分鐘的過程中應力並無太大的改變，顯然介電層只有 MSQ 的試樣對 thermal stress 並無太大的變化。再來我們觀察 PEOXIDE(500A)+MSQ 的 B-2 試樣，在薄膜沉積後應力較其他試樣的應力大，在 annealing 前後應力也無太大的改變，反而在 450°C 30 分鐘的 thermal stress 後，應力明顯的大為減小。顯然對於 PEOXIDE(500A)+MSQ 的結構而言，多了一個 450°C 30 分鐘的 thermal cycle 後對於應力的減少是有幫助的，這在製程的應用上是相當好的，因為在後段製程中常常有許多的 thermal cycles，而在 thermal cycles 後若能降低薄膜的應力，對於元件可靠度的提昇是有幫助的。最後我們觀察 O2 treated MSQ 的 B-3 試樣，在薄膜沉積後應力是介於 B-1 及 B-2 之間，但在退火後，應力明顯的增加，而在一次 450°C 30 分鐘的 thermal cycle 後應力雖稍有減小，但仍比薄膜沉積後的應力大，不像其他兩種試樣在 thermal cycle 後，應力比原本薄膜沉積後小，顯然對於 O2 treated MSQ 的薄膜而言，thermal stress 使得其應力變大，這應力變大的趨勢在製程上對於元件的可靠度會有不良的影響。

### 3-5 Stress 對鋁導線影響量測

將 Group C 之試片經一次 450°C 30 分鐘的爐管加溫後，隨後切割成 3\*3mm 大小送去包裝成成品，回來後放入可靠度量測系統的真空加溫爐內，溫度 175°C，壓力 2 mtorr，在 18000 分鐘時將加溫停止，使溫度降到 53°C 左右。測電阻的定電流密度  $J=3.3*10^4 \text{A/cm}^2$ ，使其電流密度小，以減少電流所造成的效應。每隔 30 分鐘測電阻的變化觀察 thermal stress 對導線電阻的影響見圖 5(a)，5(b)，5(c)。

首先由圖 5(a)，我們發現此線 C-1.8-1 已經 fail 了，此線大約在 13000 分鐘時電阻變得相當大。而 C-1.8-2 及 C-2.4-2 的導線隨著時間電阻並無太大的變化，而且可明顯的

由光學照片發現已經 fail 掉的樣品其導線上的黑點較多，反之，於電阻變化不大的導線光學照片上其導線上的黑點較少。同時我們觀察 C-1.8-2 及 C-2.4-2 二者線寬不同，在 18000 分左右有明顯上升的趨勢，在加熱 18000 分鐘發現  $\Delta R/R$  各為 0.043639，0.010766。其次我們觀察到在 18000 分鐘時由於加溫停止，溫度下降，所有導線的阻值全都下降，阻值在降溫下降後又慢慢爬升，而且明顯的與 thermal stress 時的電阻不規則變化不同，是與時間呈線性的變化。

首先解釋電阻變化現象，我們知電阻是由電子與聲子碰撞及電子與應力作用此二部分產生，前者隨溫度的降低而降低，其作用時間較短，而後者隨溫度下降產生張力，形成 void 使電阻上升，而此作用時間也較長，所以當電阻在停止加溫後馬上下降，其表示電子及聲子交互作用佔優勢，等到其平衡時，發現 void 也產生了，電子及應力作用則表現出來，造成電阻上升。

#### 四、結論

本篇報告我們研究鋁與 MSQ 的製程整合，包括鋁，氮化鈦與 MSQ 的熱穩定性研究，薄膜應力量測及 MSQ 與 Al 配合 damascene 結構觀察 stress 對鋁導線的影響。

在鋁與 MSQ 的熱穩定性方面，發現 O2 treated 的 MSQ 有較高的熱穩定性，其可耐溫到 425°C，才見到其電容-電壓曲線因鋁的擴散而向負電壓移動。而從 Qf 值也發現 O2 treated 的 Qf 值較小，這是因為 O2 treatment 中有高溫過程，對 sample 有 annealing 效果使得 Qf 減少；在介電層為 PEOXIDE+MSQ 時，可能在 PEOXIDE 沉積於 MSQ 上時，PEOXIDE 內含有較多的 Qf，所以由 C-V 量測求得其 Qf 較大且從電流-電壓量測也發現介電層之漏電流較大。

在薄膜應力分析方面，介電層只有 MSQ 的試樣在加溫 400°C，或 450°C 後應力並無太大的變化。PEOXIDE(500A)+MSQ 試樣，在薄膜沉積後應力較其他試樣的應力大，但在 450°C 30 分鐘的退火後，應力明顯的大為減小，且比沉積後的薄膜應力小。O2 treated MSQ 試樣，在退火後應力反而增加，這應力變大的趨勢在製程上對於元件的可靠度會有不良的影響。

在 stress 對鋁導線的影響研究方面，當加熱在 175°C 時由於 thermal stress 使得導線形成孔洞，造成電阻上升。線寬較小的(1.8  $\mu$  m)電阻變化率大。而導線冷卻至 53°C，由電阻變化可看出電子與聲子碰撞及電子與應力作用。

#### 五、參考文獻

- [1]X.W.Lin, D.Pramanik, Solid state Technology, 1998 ,pp.63
- [2] M. Igaradhi, A. Harada, H. Amishiro, IEDM, 1998, pp.31.1.1
- [3]T. Hosoda, Hyagi and H. Tsuchikawa IEEE/IRPS

#### 六、圖表

		Vfb	Qf
A-1	350°C	-6.525742	4.56E-11
	400°C	-3.965474	2.51E-11
	425°C	-2.953502	1.70E-11
	450°C	-3.287671	---
A-2	350°C	-15.04148	1.00E-10
	400°C	-12.74152	8.27E-11
	425°C	-14.99056	---
	450°C	-15.47778	---
A-3	350°C	-6.238737	2.51E-11
	400°C	-1.56854	3.26E-12
	425°C	-1.553942	3.18E-12
	450°C	-2.323424	---

表一 Group A 之 Vfb 及 Qf

	B-1(pure)	B-2(PEOXIDE)	B-3(O2 treated)
薄膜沉積後	60.09	91.25	76.69
400°C 30 分鐘 annealing	69.86	93.88	105
450°C 30 分鐘	59.46	69.8	98.8

表二 Group B multilayer 之應力量測

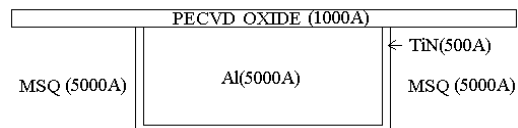
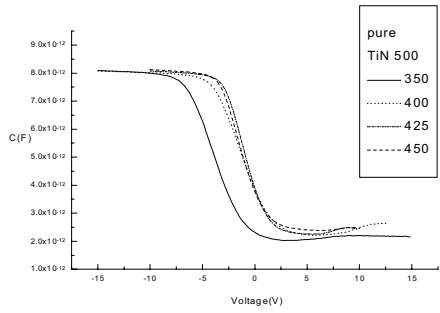


圖 1 Group C stress 對鋁導線的影響研究之樣品結構圖



(a)

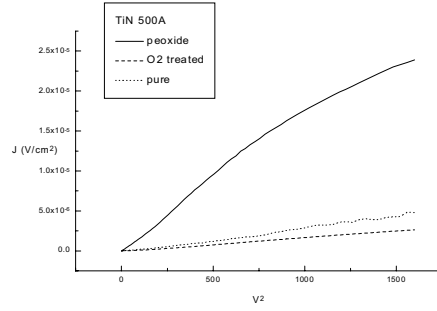
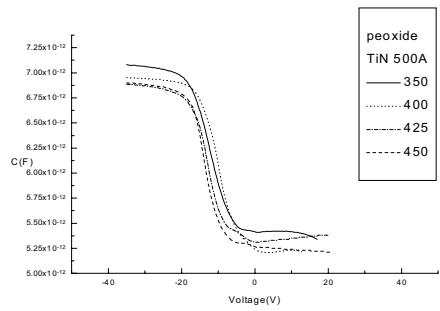
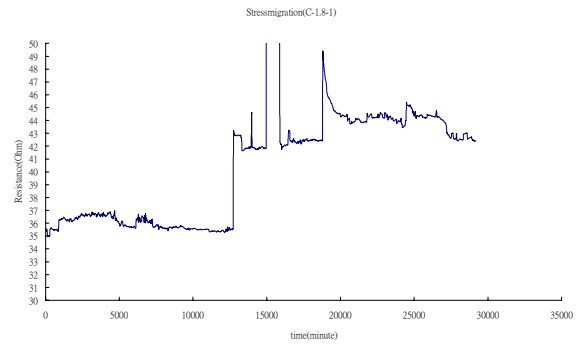


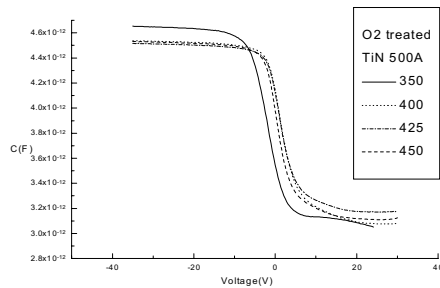
圖 4 A1,A2,A3 的 J-V<sup>2</sup> 圖



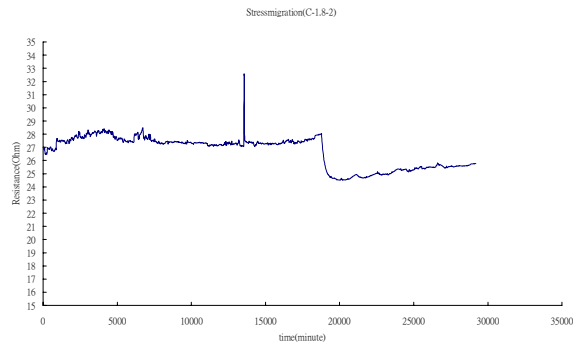
(b)



(a)



(c)



(b)

圖 2 (a)(b)(c)代表 A1,A2,A3 樣品 C-V 量測

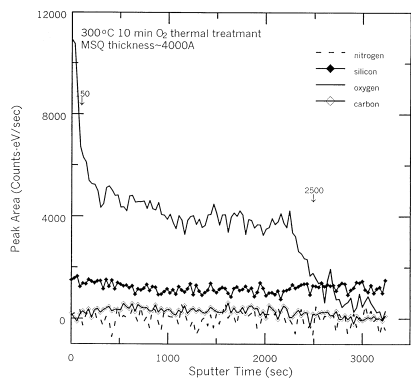
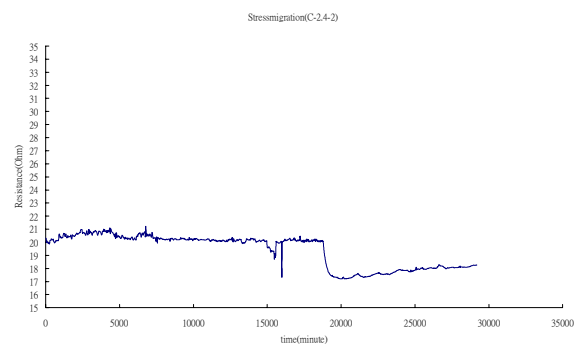


圖 3 O2 treated MSQ 之 XPS 分析



(c)

圖 5 (a)(b)(c)為 Group C Resistance Vs. Time