

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

銅與低介電材料介電層之系統整合及可靠度提升研究(1/2)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2216-E-009-023-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立交通大學電子工程學系

計畫主持人：邱碧秀

計畫參與人員：洪漢儀, 張麗君, 何嘉政, 古明龍, 曾海鑫

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 5 月 27 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告

期中

進度報告

銅與低介電材料介電層之系統整合及可靠度提升研究

(1/2)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 91-2216-E-009-023-

執行期間：91年8月1日至92年7月31日

計畫主持人：邱碧秀

共同主持人：

計畫參與人員：洪漢儀, 張麗君, 何嘉政, 古明龍, 曾海鑫

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究

計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢
涉及專利或其他智慧財產權，一年二年後可公開查詢

執行單位：國立交通大學

中 華 民 國 92 年 5 月 26 日

銅與低介電材料介電層之系統整合及可靠度提升研究(1/2)

計畫編號: NSC 91-2216-E-009-023

執行期限: 91年8月1日至92年7月31日

計畫主持人: 邱碧秀 國立交通大學電子工程學系

一、中文摘要

本計畫研究銅鎂合金(98at%Cu-2at%Mg)- SiO₂ 系統之抗電遷移能力並和銅-SiO₂ 系統比較優劣及分析其原因。由研究發現銅鎂合金比銅對介電層的附著力佳，有加 Ta 的試片附著力也比沒加的大。常壓爐管使銅產生氧化，而真空爐管真空度高，幾乎不會使金屬發生氧化。銅鎂合金比銅較能有效抵抗銅的擴散，不過並無法防止金屬氧化。退火後金屬的電阻率下降，銅鎂合金從 2.13uΩ-cm 降到 2.01uΩ-cm，銅從 2.10uΩ-cm 降到 1.98uΩ-cm，另外退火後銅的結晶性也變好。真空爐管退火後，銅比銅鎂合金來的粗糙。不過粗糙度與附著力並無相關性。

在電遷移方面，銅鎂合金較銅有較佳的抗電遷移能力，是因為銅鎂合金對介電層附著力較佳。也可觀察出金屬遷移的路徑為界面，且金屬斷路的地方並非寬窄不一的接點，顯示熱遷移效應並不明顯。

關鍵字: 電遷移, 銅鎂合金, 電子構裝, 可靠度。

Abstract

In this study, the electromigration resistance of CuMg of C (98at%Cu-2at%Mg)-SiO₂ and Cu-SiO₂ systems are explored. The adhesion strength of CuMg to SiO₂ is larger than that of Cu to SiO₂. Besides, introduction of Ta barrier layer enhances the adhesion strength. Oxidation of Cu is observed in atmosphere annealed specimens. The resistivities of the as-deposited CuMg film and Cu film are 2.13 μΩ-cm and 2.10 μΩ-cm, respectively. Vacuum annealing decreases the resistivities of the films to 2.01 μΩ-cm (CuMg) and 1.98 μΩ-cm (Cu). Surface roughness of annealed Cu is larger than that of CuMg. However, no apparent correlation between surface roughness and adhesion strength is observed.

The electromigration resistance of CuMg is better than that of Cu. The metal migrates via interface and a strong adhesion retards the transport of the metal atoms. The metallization does not fail (open) at junctions where there is an abrupt change in cross section area. This suggests that thermomigration effect is not significant.

Keyword: electromigration, Cu-Mg alloy, electronic package, reliability.

二、緣由與目的

隨著積體電路的成長，元件尺寸逐漸地縮小，使單位晶圓內的容量更大，同時加快元件的操作速度。然而內連線所造成的時間延遲，它正比於金屬導線的電阻值乘上介電層的電容值，將影響元件操作速度，因此選用銅金屬導線以及低介電係數(low-k)的材料將勢在必行[1]；其次高操作電流密度也將導致電遷移(electromigration)可靠度問題[2, 3]。

鎂在週期表是2A的元素，可和氧、氟、氮、碳等發生反應，因此在銅金屬內參雜一些鎂(2%)所形成的銅鎂合金，其合金表面處會形成氧化鎂、氟化鎂等化合物，可增加附著力[4]。附著力跟抗電遷移能力是息息相關的，因為銅金屬大部分是以金屬表面做遷移的路徑，如果能提高金屬層與介電層之間的附著力，將能增加抗電遷移的能力。而銅導線附著力不佳，且會和氧發生反應，此反應不是self-limiting，將使銅導線整個被氧化，但是銅鎂導線可在表面形成鎂的化合物，可防止銅進一步被氧化[4]。本研究實際量測銅鎂合金的附著力以及其他相關性質，並和銅金屬做比較，評估銅鎂合金是否可取代銅金屬成為新一代的金屬線材料。

本研究的金屬分4類:銅(Cu)，銅鎂(CuMg)，及加入一層300Å Ta adhesion layer 的銅(Cu/Ta)及銅鎂(CuMg/Ta)

三、結果與討論

3-1 銅鎂合金鍍膜分析

3-1-1 銅鎂合金鍍膜的附著力:

利用薄膜附著力測試系統可比較銅鎂合金或銅與介電層附著力大小。CuMg/Ta 金屬和介電層 SiO₂ 附著力為 281±21N，單位面積附著力為 49.47MPa，Cu/Ta 金屬和介電層附著力為 213±32N，單位面積附著力為 37.51MPa，CuMg 金屬和介電層附著力為 85.69±13N，單位面積附著力為 15.08MPa，Cu 金屬和介電層附著力為 55.52±12N，單位面積附著力為 9.77MPa (1MPa=5.68N/cm²)。可以發現銅鎂合金與 SiO₂ 介電層附著力較佳，這是因為鎂在週期表是 2A 的元素，可和氧、氟、氮、碳等發生反應，因此銅鎂合金表面處會形成氧化鎂、氟化鎂等化合物，以增加附著力。銅鎂合金的附著力比銅佳，此結果和文獻的趨勢一致 [4, 5]。另外有加 Ta 的試片附著力也較大，這是因為 Cu 和 Ta 之間的物理鍵結-凡得瓦力較 Cu 和介電層之間來的大所致。

3-1-2 AES 縱深觀察

圖 1 到圖 3 為 CuMg、CuMg/Ta、Cu 及 Cu/Ta 之 AES 圖。可以發現未經退火試片以及經過真空爐管退火試片氧含量都很低，而經過常壓爐管退火的試片氧含量就明顯增加許多，這是因為常壓爐管使銅不斷地氧化，而真空爐管真空度高，幾乎不會使金屬發生氧化。

利用 AES 可觀察銅鎂合金是否能有效的抵抗銅擴散到介電層內。為了比較銅或銅鎂合金在不同試片的擴散情形，本計畫定一個指標稱為擴散比例，定義如下：“銅或銅鎂合金縱軸最大值的 0.1 倍到縱軸最大值的 0.9 倍所經過的時間”除以“銅或銅鎂合金縱軸最大值到縱軸最大值的 0.9 倍所經過的時間”。擴散比例計算出來的結果如表 1。

比較 CuMg/Ta(擴散比例為 0.2615)、Cu/Ta 兩試片(擴散比例為 0.4214)可以發現在真空爐管退火下，銅鎂合金比銅較能有效抵抗銅的擴散，CuMg(擴散比例為 0.3181)、Cu(擴散比例為 0.8751)也可觀察出相同的趨勢。此結果和文獻一致[6]。

3-1-3 電阻率

如表 1 所示，銅剛沉積的電阻值為 2.10uΩ-cm，在真空爐管退火後的電阻值為 1.98 uΩ-cm，這是因為高溫使銅的結晶度(crystallinity)增加，可由之後的 XRD 觀察得知。在普通爐管退火後的電阻值為無窮大，這是因為常壓爐管非密閉的爐管，因此在高溫下銅會不斷的氧化。而銅鎂合金剛沉積以及在真空爐管退

火後的電阻值分別是 $2.14\mu\Omega\text{-cm}$ 、 $2.03\mu\Omega\text{-cm}$ ，在銅中參雜鎂會使得電阻率上升這是因為鎂的電阻率在 20°C 為 $4.24\mu\Omega\text{-cm}$ 。不過，所幸參雜不多(2at%)，電阻率並無明顯增加，如果照理論值計算 CuMg(NA)的電阻值應該是 $2.14\mu\Omega\text{-cm}(2.10\mu\Omega\text{-cm} * 0.98 + 4.24\mu\Omega\text{-cm} * 0.02)$ ，CuMg(VA)的電阻值應該是 $2.02\mu\Omega\text{-cm}(1.98\mu\Omega\text{-cm} * 0.98 + 4.24\mu\Omega\text{-cm} * 0.02)$ 都和實驗結果極為接近。而銅鎂合金在常壓爐管退火後的電阻值也是無窮大。有文獻[7]指出銅電阻 $1.76\mu\Omega\text{-cm}$ ，在參入 2at%鎂之後，電阻率上升為 $1.81\mu\Omega\text{-cm}$ ，也和理論值接近。電阻率可包含和溫度有關的部分以及和溫度無關的部分，其中和溫度無關的部分可分為四項： ρ_{SF} 、 ρ_{GRAIN} 、 ρ_I 、 ρ_{IG} ， ρ_{SF} 代表電子在薄膜表面散射所造成的電阻率， ρ_{GRAIN} 代表電子在晶界散射所造成的電阻率， ρ_I 代表電子因雜質散射所造成的電阻率， ρ_{IG} 代表電子因薄膜內部缺陷所造成的電阻率。銅鎂之電阻較高，主要是因為鎂所造成雜質散射。

3-1-4 表面粗糙度

圖 4 為 CuMg、CuMg/Ta、Cu、Cu/Ta 試片的 AFM 照片，所有試片測量的 Rms 值如表 1 所示。觀察結果可以發現真空爐管退火後銅比銅鎂合金要來的粗糙，加入 Ta 粗糙度比沒加 Ta 來的高一點，而使用常壓爐管因為機台非密閉系統，當高溫退火時銅會不斷的氧化，因此面非常粗糙，相反的，在真空爐管為密閉系統，真空度在 $10^{-5}\text{-}10^{-6}$ torr，製程中只通入氮氣，因此幾乎不會有氧化現象。因此要得到最平滑的表面，使用銅鎂合金，不加 Ta，並且使用真空爐管，將是最好的選擇，不過 Ta 在銅製程當中扮演極重要的腳色，它可當作潤濕層、阻障層、增加抗電遷移能力，並無法捨棄不用。

有文獻[4]指出，如果金屬表面較粗糙，代表和介電層潤濕程度不夠，也表示金屬層與介電層附著力不夠，反之則相反。本實驗發現，銅比銅鎂合金粗糙，而附著力也較小，符合上述推論。不過有加入 Ta 的試片比沒加入 Ta 的試片粗糙，附著力卻較大，因此附著力和表面粗糙度並無明顯關聯。或著可以說：當 barrier 一致時，金屬表面較粗糙，表示金屬層與介電層附著力不夠；當 barrier 不一致時，無法做比較。

3-2 電遷移

Cu-SiO₂和 CuMg-SiO₂之電阻對時間的變化圖以及活化能的計算結果如圖 5 及 6 所示，活化能的計算利用下列公式：

$$\frac{dR}{dt * R_0} = AJ^n \exp\left(-\frac{Q}{KT}\right)$$

由時間對電阻變化圖可以發現金屬導線有 healing effect，這是因為遷移所造成的突物與空缺堆積，會產生突物梯度以及空缺梯度，以抵消電遷移之效應，因此所量測出的電阻值會有些微震盪的情形。

比較銅和銅鎂合金可以發現以銅鎂合金當金屬線所得到的活期以及活化能要比銅金屬要來的高。這是由於銅鎂合金在退火的過程中，鎂會在表面形成一層鎂的化合物，增加界面附著力。當活化能介於 0.7eV-1.2eV 時，銅的擴散的路徑為界面[8]，界面附著力提昇，當然就較能提高活期以及活化能。

四、結論

以含 2at%Mg 之銅鎂合金取代 Cu 金屬可以發現銅鎂合金分析中可以發現銅鎂合金比銅對介電層 SiO₂ 的附著力佳，有加 Ta 的試片附著力也比沒加的大。常壓爐管使銅在表面以及內部都產生氧化，而真空爐管真空度高，幾乎不會使金屬發生氧化。銅鎂合金比銅較能有效抵抗銅的擴散，不過並無法防止金屬氧化。退火後金屬的電阻率下降，銅鎂合金從 2.13uΩ-cm 降到 2.01uΩ-cm，銅從 2.10uΩ-cm 降到 1.98uΩ-cm，另外退火後銅的結晶性也變好。真空爐管退火後，銅比銅鎂合金來的粗糙，不過粗糙度與附著力並無相關性。

在電遷移的測試中，金屬層是使用銅鎂合金或銅，而介電層是使用 SiO₂ 活化能分別是 0.8951eV 和 0.9582 eV，在 300°C 電流密度 2.8 MA/cm² 的 Life time 分別是 54100 秒及 64810 秒。銅鎂合金較銅有較佳的抗電遷移能力，是因為銅鎂合金對介電層附著力較佳。也可觀察出金屬遷移的路徑為界面，且金屬斷路的地方並非寬窄不一的接點，顯示熱遷移效應並不明顯。

五、成果自評

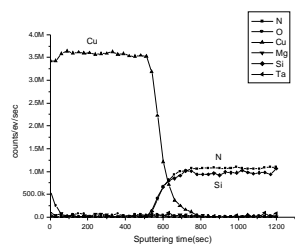
本計畫原申請為三年期，但核定為二年期，因此研究進度有作調整，以期能在兩年內完成原訂三年的工作。目前實驗部分完成的工作項目是整個計畫的一半。和預期進度相符。計畫研究成果經整理後可發表於國際學術期刊論文。目前正著手整理中。

六、參考文獻

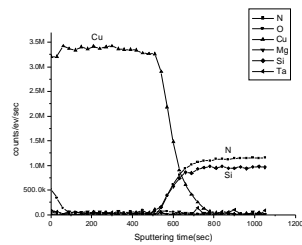
- 1 P. S. Ho, "Low K Dielectrics For Submicron Interconnect Applications", Laboratory for Interconnect and Packaging, May 2000.
- 2 C. Ryu, K. W. Kwon, A. S. Loke, V. M.

- Dubin, R. A. Kavari, G.W. Ray, and S. S. Wong, "Electromigration Submicron Damascene Copper Interconnects", Symposium on VLSI Technology Digest of Techn Papers, 1998.
- 3 L. Amaud, G. Tartavel, T. Berger, D. Mariolle, Y. Gobil, and I. Touet "Microstructure and Electromigration in Copper Damascene Line", International Reliability Physics Symposium, 1999.
 - 4 G. Braeckelmann, R. Venkatraman, C. Capasso, and M. Herrick, "Integration and Reliability of Copper Magnesium Alloys for Multilevel Interconnects", Interconnect Technology Conference 2000.
 - 5 V. A. Bessonov, S. A. Barantsev, L. I. Uliyanova, "On Application of Multicomponent Copper Alloys for Making Microstrip Line Conductors of Microcircuits", MSMW' 98 Symposium Proceedings, 1998.
 - 6 S. P. Muraka, P. M. Ajayan and Bonevich, "Electrical Stability and Microstructure Evolution in Thin Films of High Conductivity Copper Alloys", Advanced Interconnect Science Technology, 1999.
 - 7 T. Takewaki, R. Kahara, T. Ohmi and T. Nitta, "Excellent Electro/Stress-Migration-Resistance Surface-Silicide Passivated Giant-Grain Cu-Mg Alloy Interconnect Technology for Giga Scale Integration", Electron Devices Meeting, 1995.

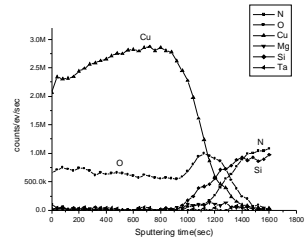
8 M. J. Attardo and R. Rosenbe
“Electromigration Damage in Aluminum
Film Conductors” , Journal of Applide
Physics, Vol.41, pp.23842386, May
1970.



(a)

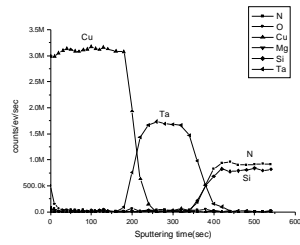


(b)

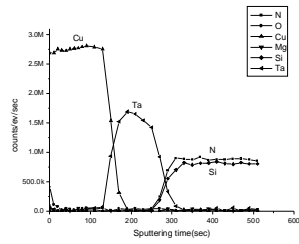


(c)

圖 1 CuMg 膜(a)未退火前，(b)真空退火，
(c)大氣退火之 AES 圖。

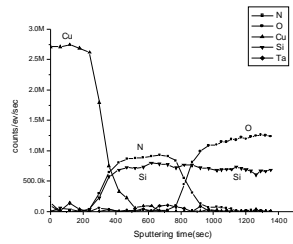


(a)

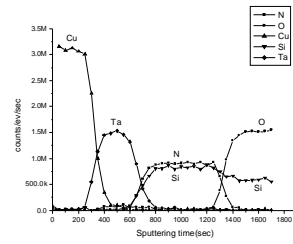


(b)

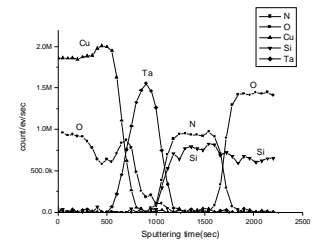
圖 2 CuMg/Ta 膜(a)未退火前，
(b)真空退火之 AES 圖。



(a)



(b)



(c)

圖 3 (a)Cu 膜真空退火, (b)Cu/Ta 真空退火, (c)Cu/Ta 大氣退火之 AES 圖。

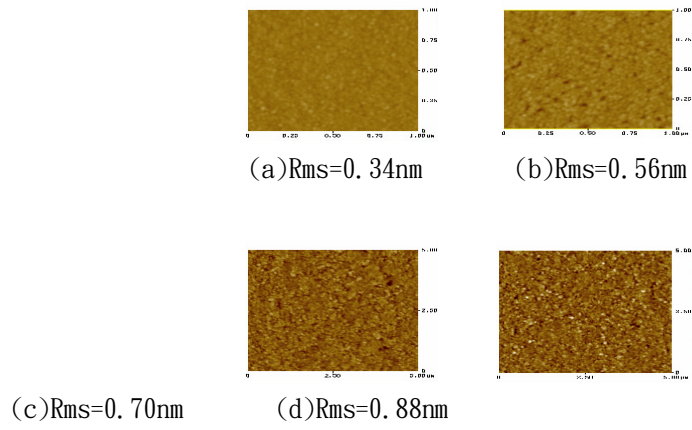
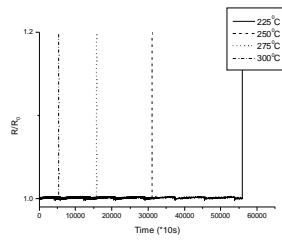
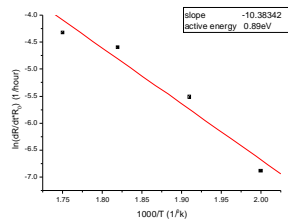


圖 4 真空退火之銅鎂合金膜 AFM 照片
 (a)CuMg(b)CuMg/Ta(c)Cu(d)Cu/Ta.

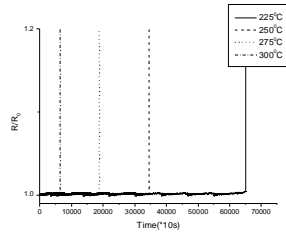


(a)

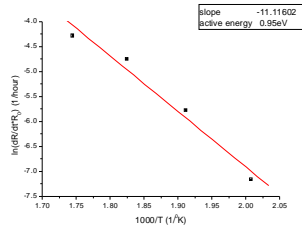


(b)

圖 5 Cu-SiO₂(a) Relative resistance changes versus stress time, (b) Arrhenius-type plot of data for activation energy.



(a)



(b)

圖 6 CuMg-SiO₂ (a) Relative resistance changes versus stress time, (b) Arrhenius-type plot of data for activation energy.

表 1 銅鎂合金膜所量測出的電阻率、擴散比例以及 Rms

編號	Rms(nm)	擴散比例	電阻率($\mu\Omega\text{-cm}$)
CuMg(NA)	0.33	0.2607	2.13 ± 0.003
CuMg(VA)	0.34	0.3181	2.01 ± 0.001
CuMg(FA)	4.91	0.3814	無限大
CuMg/Ta(VA)	0.56	0.2615	2.14 ± 0.004
CuMg/Ta(NA)	0.38	0.2573	2.03 ± 0.003
Cu(NA)	0.64	N/A	2.10 ± 0.002
Cu(VA)	0.70	0.8751	1.98 ± 0.003
Cu(FA)	8.30	N/A	無限大
Cu/Ta(NA)	0.83	N/A	2.11 ± 0.004
Cu/Ta(VA)	0.88	0.4214	1.97 ± 0.001
Cu/Ta(FA)	10.30	0.3685	無限大

VA: 真空爐管退火

FA: 常壓爐管退火

NA: 未退火

