

Cu 배선에 Al층간 물질 첨가에 의한 EM특성 개선

이정환 · 박병남 · 최시영†

경북대학교 전자·전기·컴퓨터 공학부
(논문접수일 : 2001년 9월 3일)

Improvement of electromigration characteristics in using Al interlayer

Jeung Hwan Lee, Byung Nam Park, and Sie Young Choi†

School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea
(Received September 3, 2001)

요 약

본 연구에서는 차세대 Cu 박막 증착 방법으로 유망한 CVD(chemical vapor deposition)방법으로 실질적 배선 증착 공정과 동일하게 시행하여 여러 조건에서 Cu를 증착하여 가장 EM에 관하여 높은 내구성을 가지는 조건을 알아보고 또한 박막의 미세구조가 EM에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보았으며 MOCVD 방식으로 증착 한 Cu 박막의 표면과 barrier layer인 TiN과의 응력(stress)을 조사하여 차세대 EM 모델인 grain boundary grooving 모델에 실질적으로 적용하였다. 또한, 이러한 실험을 행 한 후에 정확한 EM 현상을 관찰하고 분석하여 반도체 소자의 신뢰성과 성능개선, 결합 예측, 그리고 소자의 배선설계에 중요한 정보를 제공할 것이다. 또한, 보다 우수한 EM 특성을 가질 수 있게 하기 위해 barrier layer위에 Cu와의 접착력(adhesion)을 향상시킬수 있는 promoter로 Al을 이용하여 얇게 증착한 후 EM 축적 파괴 실험을 하여 EM에 대한 높은 저항성을 실질적으로 가질 수 있는지에 대한 실험도 병행하였다.

Abstract

Acceleration in integration density and speed performance of ULSI circuits require miniaturization of CMOS and interconnections as well as higher current density capabilities for transistors. A leading candidate to substitute Al-alloy is Cu, which has lower resistivity and higher melting point. So we can expect much higher electromigration resistance. In this paper, we are going to explain the major features of EM for MOCVD Cu according to variant conditions. We compared the life time and activation energy of MOCVD Cu with those of E-beam Cu and Al in the same conditions. The electromigration experiments were performed with Cu/Al/TiN multilayer. Experimental results shows that the deposition rate and electromigration characteristics of Cu thin film were improved by the Al interlayer.

1. 서 론

지속적인 반도체 소자의 고집적화로 ULSI 시대에서는 반도체 공정의 개발과 이에 상응하는 반도체 소자의 물성 연구가 기존에 발생되지 않았던 많은 문제점들에 부딪치게 되었다. 그 중에 하나로 소자

를 서로 연결하는 배선 금속물질의 선평이 미세해짐(0.25 μm 미만)에 따라 발생되어지는 Electromigration (EM)이 중요한 문제로 대두되었다 [1]. 이는 좁은 금속 배선 내부를 지나는 고밀도의 전류에 의해 많은 양의 전자들과 배선을 구성하는 금속물질의 원자들 간의 상호충돌에 의해 전자의 일부 운동에너지가

† E-mail : sychoi@ee.knu.ac.kr

원자에게 주어져 에너지를 받은 원자들이 이동하는 현상을 말한다. 이러한 원자의 이동에 의한 금속 배선의 저항 증가가 장시간 진행될 경우, 배선 내에 공극(void)이나 균열(crack)의 발생에 의해 결국 배선의 파괴를 낳는 심각한 문제를 초래할 수 있다. 또한, 배선의 저항 증가는 전력소모의 증가와 이로 인한 저항열(joule heat) 등을 초래하고, RC 지연시간의 증가로 고속 소자의 성능을 저하시키는 문제가 된다. 따라서 이는 반도체 칩 내부를 구성하는 일부 소자들만의 파괴를 의미하는 것이 아니라, 반도체 칩 전체의 기능 상실을 초래하는 것으로 DRAM, Logic 등의 다층구조를 형성하는 반도체 구조에서는 이러한 현상들이 두드러지게 나타날 것이다. [2]

그러므로 이 현상들은 고집적화, 다층 레벨(level) 구조화에 맞추어 꼭 연구 보완되어야 할 필수적인 과제이다. 최근에는 다결정 순수 Al보다는 약 1000 배 가량 우수하고 Al-alloy보다는 약 30~100 배 가량 우수한 Cu가 많은 연구의 대상이 되어지고 있다. [3] 이는 Cu가 Al보다 열적으로 안정하며 낮은 저항 ($1.68 \mu \Omega \text{cm}$)을 가지고 있고 또한, 보다 큰 원자량 (이동도가 작음)을 가지고 있기 때문이다. 그러나, 아직까지는 이러한 차세대 금속 배선 물질로 각광을 받고 있는 Cu 배선의 EM 특성은 단순히 Al 배선에 비해 우수한 특성을 가지고 있다는 것만 알려져 있을 뿐, 이것에 대한 체계적 연구는 아직 미진한 상태로 남아 있다.

EM 현상에 있어 가장 많은 영향을 주는 것은 배선 박막의 미세구조이다. 이러한 점을 고려하여 Cu를 증착 하여야만 한다. 비저항은 식 (1)에서와 같이 저항열(joule heat, Q)이나 EM의 직접적인 요인이 driving force(F)에도 영향을 미친다.

$$F = Z^* e \rho J \quad (1)$$

여기서, Z^*e : effective charge
 ρ : 비저항
 J : 전류밀도

또한, Cu 박막의 배향성은 배선구조의 미세화에 의해 전자들의 이동경로 및 저항열에 의한 stress에 있어 한층 더 중요한 영향을 가진다. 그러므로 배향성은 평균 수명 시간(mean time to failure, MTF)을

나타내는 식 (2)에서 보이는 것과 같이 (111) 방향으로의 증착이 EM에 대해 높은 저항성을 가짐을 알 수가 있다. [5]

$$MTF = \frac{A}{\sigma^2} \log \left(\frac{I_{(111)}}{I_{(200)}} \right)^3 \quad (2)$$

여기서, A : 결정립크기
 σ : 이동 분포

$$Q = J^2 \times \frac{Wh}{A} R_{th} \quad (3)$$

여기서, R_{th} : 열적 저항

결정립의 크기는 식 (2)와 (3)에서와 같이 클수록 좋다. 이는 결정구조내의 원자가 움직이기 쉬운 경로인 결정립계를 줄여주기 때문에 EM 저항성 측면에서 바람직하고 또한, 식 (3)에서와 같이 저항열(joule heat, Q)의 감소를 일으킨다. 그리고 EM에 대하여 가장 이상적인 구조라 할 수 있는 Bamboo 구조 형성에 결정적인 영향을 미칠 수도 있기 때문에 박막 성장에 이 점을 고려하여야 한다.

따라서, 본 연구에서는 EM에 대한 저항력이 우수하다고 알려진 Cu 배선이 실질적인 반도체 배선 공정방법(MOCVD)에 적용될 경우 발생하는 여러 현상 즉 depletion, accumulation, hillock 등을 다양한 조건에서 연구하였다.

II. 실험

본 연구에서 사용된 시편은 SiO_2/Si 위에 barrier layer로 TiN을 스퍼터링 방식으로 500 Å 증착 한 것이며 Cu를 증착하기전 TiN표면에 H_2 plasma 전처리과정을 수행하여 두 물질 사이의 흡착력(adhesion)을 향상시켰다. [4] 그림 1은 본 연구에서 Cu 박막을 증착하기 위한 MOCVD 장비를 나타낸 것인데, 이러한 전처리 과정을 진공에서 일괄처리하기 위해 반응기 위에는 inductively coupled plasma(ICP) 장치를 설치하였고, shower head는 H_2 전처리 공정을 할 수 있도록 특수하게 제작하여 한 반응기내에서 H_2 전처리를 행한 뒤 *in situ*로 Cu 박막을 성장할 수 있도록 하여 공기 중에 노출을 방지하였다. Cu의 증착을

위해 사용한 precursor는 슈마허(shumacher)에서 제작한 (hfac)Cu(I)(tmvs)를 이용하였다. 또한 EM에 관한 높은 저항성을 가지는 Cu 박막 증착 조건을 알기 위해 여러 공정조건에서 실험을 행한 결과 표 1 과 같은 박막 증착 조건을 알 수 있었다.

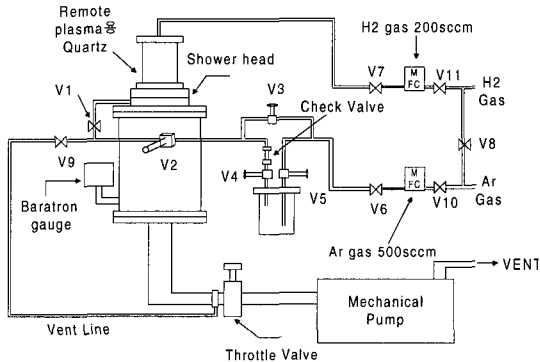


Fig. 1. Schematic diagram of experimental MOCVD system.

Table 1. The deposition conditions of Cu films.

Process parameters	Values
Substrate temperature(°C)	200
RF power(Watt)	100
Working pressure(Torr)	1
Carrier gas flow rate(sccm)	150(Ar gas)
Down stream gas flow rate(sccm)	100(H ₂ gas)
Bubbler temperature(°C)	50
Chamber wall, heating line and water bath temperatures(°C)	65

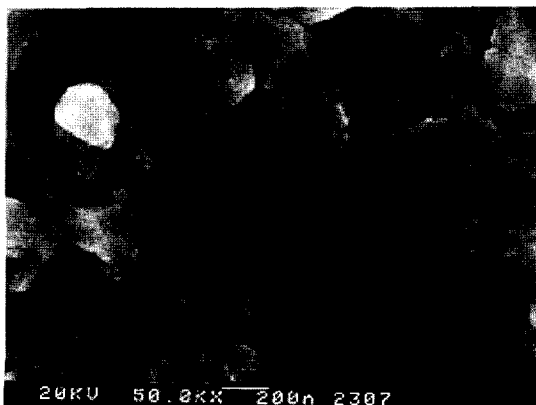


Fig. 2. The SEM photograph of Cu surface.

그리고 위의 공정조건에서 증착된 Cu 박막의 특성을 표 2에 나타내었고, SEM 표면사진을 그림 2에 나타내었다. 본 연구에서는 이러한 동일한 특성을 가지는 Cu 박막을 증착하여 EM에 대한 특성을 조사하였다. Cu 패턴을 형성하기 위해 그림 3과 같은 공정을 행하여 길이는 2000 μm , 각각의 선폭은 20 μm , 10 μm 인 Cu 패턴을 형성하였다. 전압에 선형적인 특성을 나타내는 히터(heater)와 정전류원을 이용하여 만든 EM측정 장치로 EM에 큰 영향을 미칠 것으로 생각되는 히터 온도와 전류밀도를 변화시켜 가면서 MTF와 활성화 에너지를 계산하였다.

박막의 비저항에 있어 TiN일 경우 15 $\mu\Omega\text{cm}$ 이고 Al일 경우 2.66 $\mu\Omega\text{cm}$ 이다. Al이 TiN에 비해 낮은 저항성을 가짐으로 Cu 박막이 형성하는데 있어 보다 우수한 박막을 형성할 수가 있다. 이러한 특성을 실제로 실험하였을 경우 어떠한 결과를 가지는지를 알아보기 위해 Al을 두계별(#2: 350Å, #3: 750Å, #4: 1000Å, #5:

Table 2. The properties of Cu films using in EM measurement.

Resistivity ($\mu\Omega\text{cm}$)	배향성 (111/200)	Grain size (Å)	Thickness (Å)
2.1	100/47.1	3200	3000

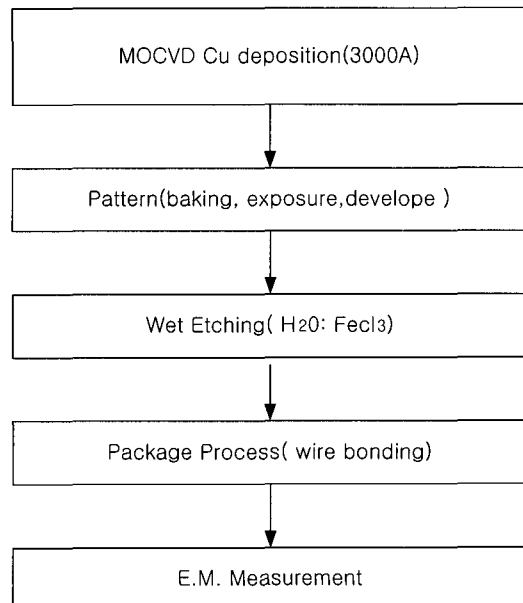


Fig. 3. EM measurement process of Cu thin film.

2000 Å) 진공증착법으로 TiN위에 증착을 하였다. 그리고 기판 위에 Al을 다양한 두께로 증착한 시편과 TiN시편을 동시에 loading을 하여 실험을 하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1 저항이 다른 Cu 박막의 EM 특성

저항이 다른 Cu 배선에 대한 EM 특성을 비교해 보기 위해서 Cu 박막의 증착 온도를 달리하여 배선의 저항이 각각 6.12Ω과 8.34Ω으로 차이가 나는 Cu 배선에 대해 50 MA/cm²의 전류를 인가하였다. 그 결과 그림 4에서 볼 수 있듯이 시간에 따라 저항이 높은 배선에서 전압의 증가가 심하게 나타났다. 그림 5는 두가지 측정시료에 대한 cumulative failure를 나타낸 것이다. 그림 4와 5에서와 같이 같은 물질의

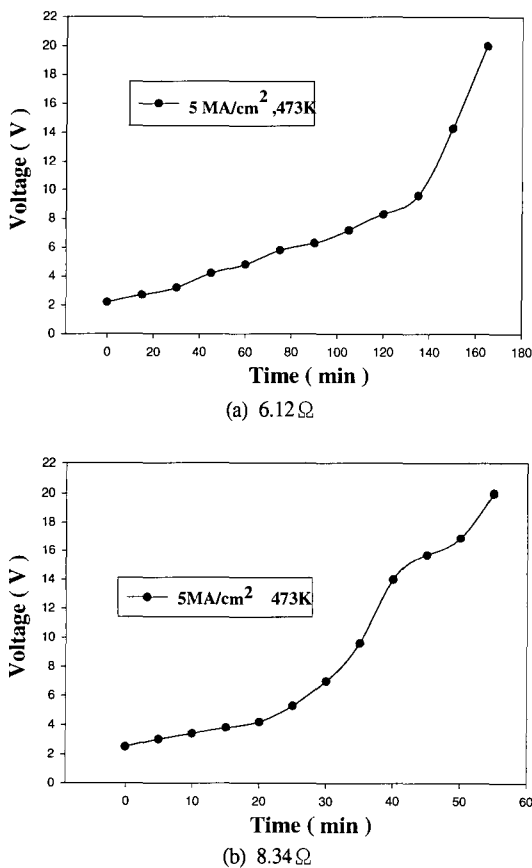


Fig. 4. the variation of voltage to resistance of Cu films.

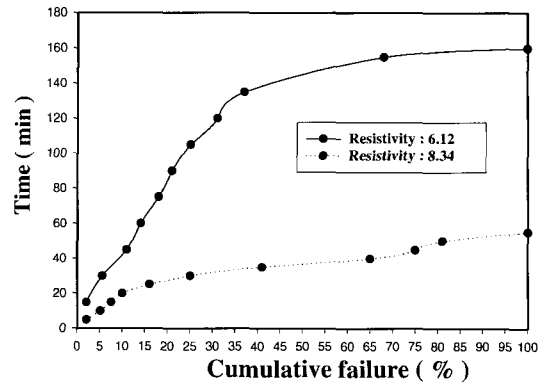


Fig. 5. Cumulative failure vs. time.

경우, 전기적저항이 낮은 배선의 MTF가 약 90분으로 저항이 높은 배선보다 3배 가량 길게 나타난 것을 알 수 있다. 그리고 EM의 중요한 변수 중에 하나인 활성화 에너지를 계산해 본 결과 저항이 낮은 배선은 1.27 eV, 저항이 높은 배선이 1.22 eV로 나타났다. 이러한 결과는 저항의 증가가 driving force와 joule heat에 증가를 가져와 MTF가 감소하고, 활성화에너지가 증가하는 것을 나타낸다.

3.2 Cu 박막의 열적 안정성

흔히 Cu는 Al보다 높은 용융점을 가짐으로써 EM에 대한 높은 저항을 가지는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 MOCVD 법과 E-beam evaporation 법을 각각 이용한 Cu 박막과 진공 열증착 방법으로 형성한 Al을 동일한 배선으로 형성하여 측정 온도별 활성화 에너지를 비교하였다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 MOCVD Cu와 E-beam Cu는 온도의 증가에도 불구하고 활성화 에너지가 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 그러나 Al의 경우 온도에 따라 활성화 에너지가 감소함을 알 수가 있다. 이는 Cu 박막의 성질이 Al 박막보다 열적으로 안정함을 보여준다. 또한 같은 Cu 박막이라도 증착 하는 방법에 따라 활성화 에너지가 서로 다른 것을 알 수가 있었다. 이는 MOCVD Cu 박막이 E-beam Cu보다 EM에 관하여 높은 저항성을 가지는 것을 알 수 있으며, Al에 비해서 Cu 박막이 EM에 대해서 우수한 특성을 보일 뿐만 아니라 열적으로도 안정된 특성을 보이고 있다.

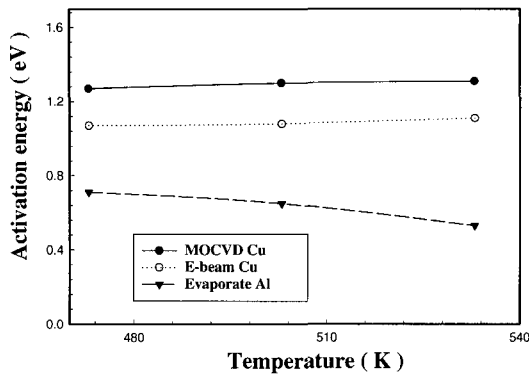


Fig. 6. Variation of activation energy relative to substrate temperature.

3.3 선폭의 변화에 따르는 EM 특성 변화

Design rule에 의하면 집적도가 4 배가 되면 도선의 크기가 1/2로 줄어들고 이때의 MTF는 1/4로 줄어드는데 이러한 현상은 앞으로 선폭이 0.25 μm 만에서는 EM 현상이 더욱 가속화되어짐을 의미한다. 따라서, MOCVD Cu에서도 이러한 현상에 대하여 어떠한 변화가 있는지 조사해 보기 위해서 동일한 온도(503 K)와 전류밀도(5 MA/cm²)에서 실험해 본 결과 그림 7에서와 같이 선폭이 20 μm 일 때보다 선폭이 1/2로 줄어든 10 μm 일 때가 현저히 MTF가 감소함을 알 수가 있었다. 또한, 각각의 활성화 에너지값 역시 선폭이 20 μm 일 때가 약 1.3 eV 이고 선폭이 10 μm 일 때가 약 1.19 eV로 선폭이 감소함에 따라 활성화 에너지 값이 MTF 값의 감소와 함께 줄어들음을 알 수가 있었다.

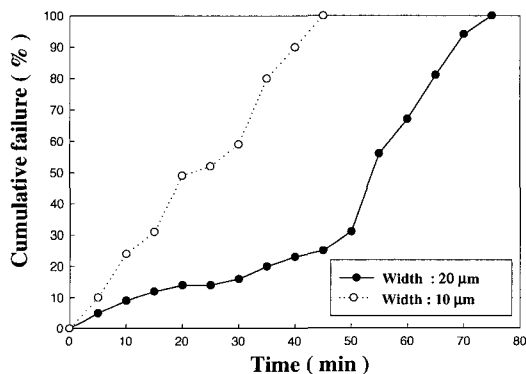


Fig. 7. Cumulative failure vs. time.

3.4 Cu 박막의 failure 현상

Cu 박막을 여러 조건에서 EM을 측정해 본 결과 배선이 개방되는 지점에서는 일정한 형태의 기울기를 가지고 있다가 갑자기 증가하는 현상이 일어나는데 이는 crowding current에 의한 것으로 여겨진다. 이러한 crowding current의 직접적 발생요인으로는 미세구조에서의 공극(void), 균열(crack)에 의한 요인이 크다. 그리고 EM을 실험하는데 있어 고온 상태에서 측정하는 관계로 TiN과의 열에 의한 응력(stress)의 발생으로 박막 자체의 EM 현상이 가속화 되어짐을 알 수가 있었다. 그림 8(a)와 (b)는 EM 현상이 발생되어질 때 흔히 일어나는 대표적인 현상들인데 이는 음극 쪽에 원자들이 이동하여 양극 쪽으로 물리는 현상들이다. (c), (d)는Cu 배선이 개방된 모습을 나타낸 것이다.

3.5 Cu/Al/TiN의 EM개선 및 특성

그림 9는 Al 두께에 따라 시간별 배선이 축적 파괴되는 시간을 나타내었다. 결과에서 보면 Al 두께가 증가함에 따라 처음에는 긴 MTF를 가졌다. 이때 Al 두께가 750 Å일 경우에 기존의 Cu/TiN 구조에 비해 3배 정도의 긴 MTF를 가짐을 알 수가 있었다. 또한, Al 두께가 약 1000 Å 이상이 되었을 경우 MTF가 Cu/TiN보다 MTF시간이 짧아지는 것을 알 수가 있었는데 이는 Al 두께가 전체 박막의 두께에 30%이상 차지하게 되면 Al 박막에 의해 Cu 박막이 따라서 이동되어지기 때문이라 생각되어진다. 따라서, 이러한 점을 고려하여 Al 두께를 적절히 조절하여야 될 것이다.

그림 10은 다양한 온도에서 Cu/TiN과 Cu/Al/TiN을 상대 비교하여 활성화에너지 값으로 나타낸 것이다. 여기에서 Al의 두께는 앞에서 실험한 결과에서 가장 좋은 EM 저항을 가지는 750 Å로 증착하였다. 실험을 행 한 결과 두 가지 시료의 경우 초기 온도가 증가함에 따라 활성화에너지 값도 증가하였으나 온도가 Cu의 용융점(melting point)의 30%선에 이르자 활성화에너지 값의 증가가 둔화되었다. 그러나, 여기에서도 상대적으로 Cu/TiN에 비하여 Cu/Al/TiN가 높은 MTF를 가짐으로써 높은 활성화에너지 값을

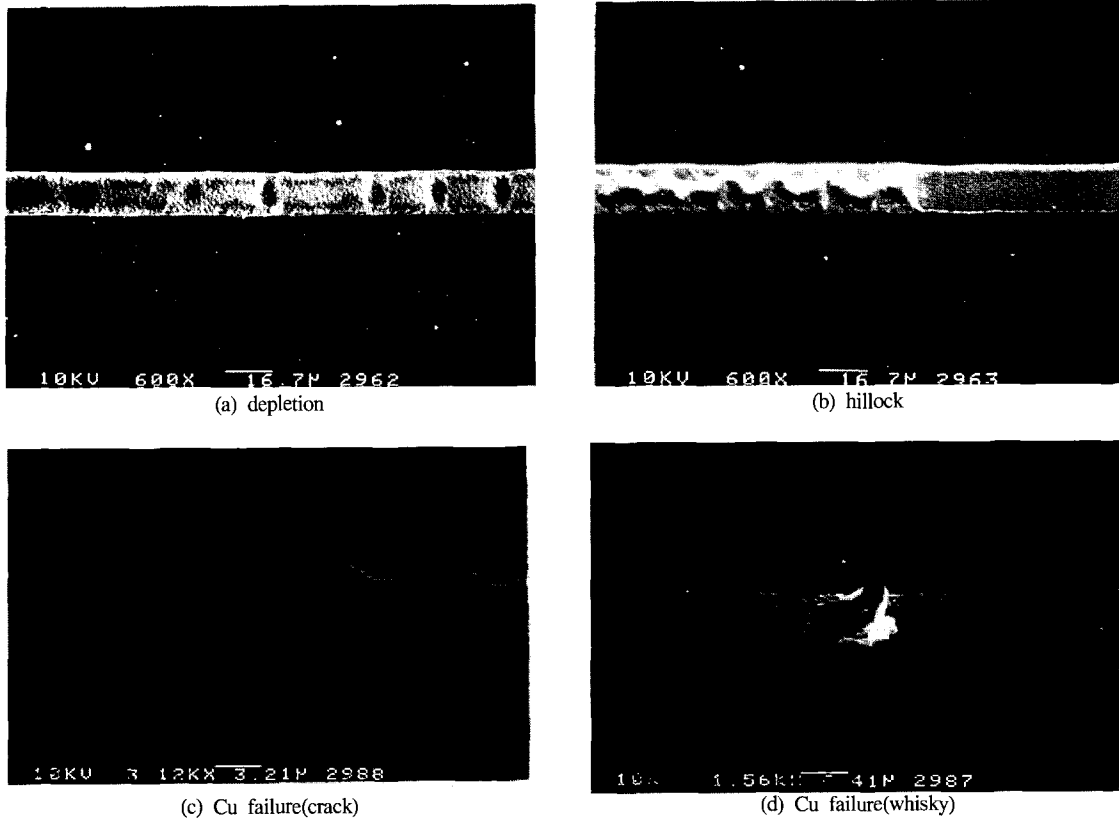


Fig. 8. A variety of electromigration damages in thin film conductors(SEM).

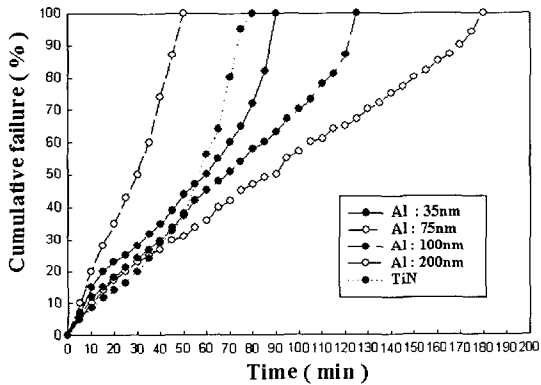


Fig. 9. Cumulative failure vs. time at each Al thickness.

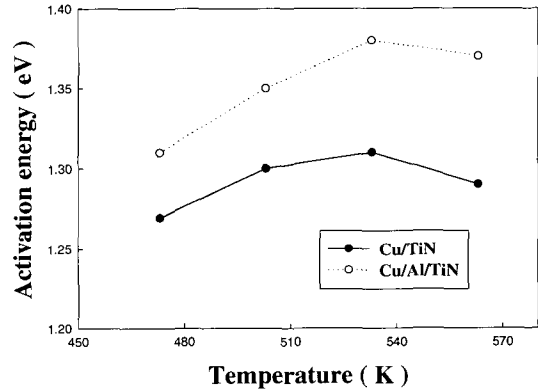


Fig. 10. Variation of activation energy relative to substrate temperature.

가지는 것으로 나왔다. 이는 앞에서 언급한 것과 같이 Cu와 Al의 계면사이에서 새롭게 형성된 화합물에 의하여 EM현상이 발생될 때 계면에서 발생되어지는 열응력에 의한 균열, 공동을 막아줌으로써 보

다 EM에 대하여 높은 저항을 가지는 것으로 생각되어진다. 또한, 앞으로의 배선구조 형태가 될 trench 구조에서는 Cu와 TiN의 접하는 면적이 지금보다는 훨씬 커짐에 따라 이에 관한 연구가 함께 병행되어

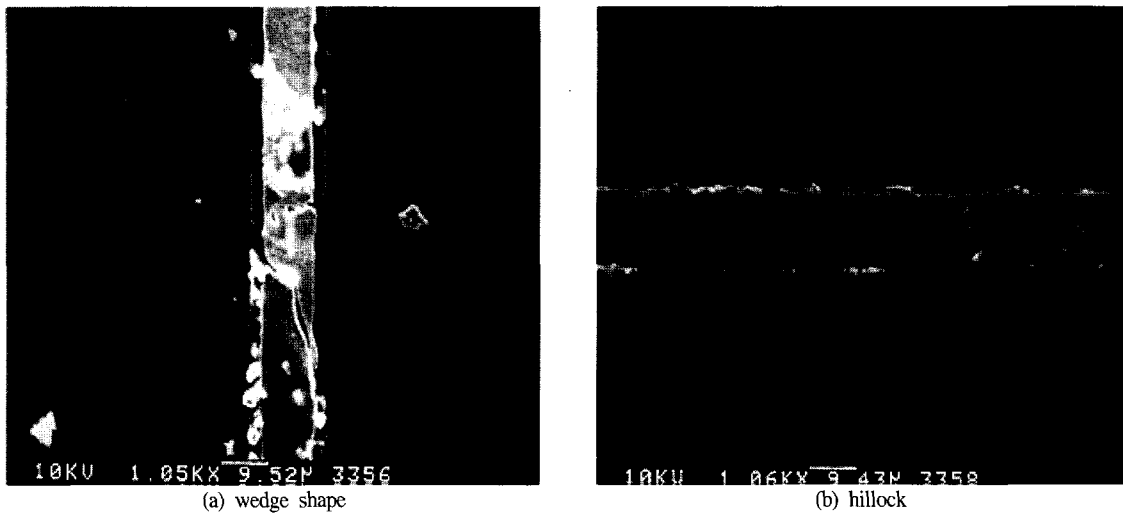


Fig. 11. A variety of electromigration damage in thin film conductors(SEM).

져야 할 것이다. 그림 11은 EM에 의해 배선이 개방되었을 때의 표면사진이다. 상대적으로 Al을 두껍게 증착하였을 경우 주 이동원인이 Al에서 발생되어졌다.

IV. 결 론

EM 특성으로는 우선 서로 다른 미세구조를 가진 Cu 박막을 EM 측정을 한 결과 결정립의 크기가 크고 고르고, 결함이 없는 구조가 보다 긴 MTF를 가지는 것으로 나왔다. 이러한 미세구조는 박막의 비저항과도 연관되는 것으로 EM에 있어 여러 구동력에 있어 가장 중요한 요인으로 작용하고 있다.

선폭에 따르는 EM 특성으로는 비록 같은 측정 조건이지만 선폭이 짧은 것이 빨리 개방되는 것을 관찰할 수가 있었다. 이는 동일한 조건이지만 원자의 이동 할 수 있는 면적이 작기 때문이라 생각되어진다. 이때의 활성화에너지 값은 선폭이 10 μm 일 때는 1.19 eV이고 선폭이 20 μm 일 때는 1.3 eV가 나왔다.

차세대 배선구조는 트렌치 구조의 형태를 가질 것이라 생각되어진다. 이를 경우 Cu와 TiN사이의 면적이 보다 더 커질 것이다. 그러나, Cu는 Al과는 달리 TiN과의 어떠한 화합물도 형성하지 않기 때문에 차세대 배선에서의 EM해석 모델인 grain boundary

grooving 모델에 적용하였을 경우 보다 낮은 활성화에너지 값을 가질 것으로 생각되어진다. 이를 개선하기 위해 Cu와 TiN사이에서 Al을 첨가하여 층간의 화합물을 형성하여 응력을 완화시켰다. 이러한 점을 실질적으로 알아보기 위해 다양한 두께로 Al을 증착 한 후 동일한 조건에서 EM 측정을 해본 결과 Al이 750 Å일 때 가장 좋은 EM 특성을 가졌다. 이때의 MTF는 기존의 Cu/TiN보다 약 3배 정도 길었다. 그러나, Al 두께가 점점 두꺼워짐에 따라 MTF의 길이는 짧아졌다. 이는 Al의 두께가 증가함에 따라 전체 배선 두께에서 Al이 차지하는 비중이 커짐에 따라 주 이동원이 Cu에서 Al으로 바뀌었기 때문이라 생각되어진다. 이러한 현상은 Al 두께가 전체 배선의 두께에 30% 이상일 경우 나타나졌다. 온도별 EM 특성도 비교해 본 결과 기존의 Cu/TiN보다 높은 활성화에너지 값을 가지는 것으로 나왔다. 또한, 이때 EM 발생시 나타나는 현상은 전형적인 결정립계 확산에 의한 EM 파괴 현상을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] James R. Black, IEEE Trans. Electron Devices, ED-16, 338 (1969).
- [2] C. V. Thompson and J. R. Lloyd, Mater. Res. Bull. 18, 19 (1993).

[3] J. Tao, N. W. Cheung, C. Hu, *IEEE Electron Device Lett.* **14**, 249 (1993).

[4] 이종현, 이정환, 최시영, 16회 진공학회 학술발

표회 79 (1999).

[5] C. Ryu, A. L. S. Loke, T. Nogami and S. S. Wong
IEEE Int. Rel. Phys. Symp. Proc. 201 (1997).