

MOCVD 방식으로 증착한 Cu 박막의 Electromigration 특성

이 정 환, 이 원 석, 이 중 현, 최 시 영
경북대학교 전자·전기공학부
E-mail : cvdlab@hanmail.net

Characteristics of electromigration in Cu thin films deposited by MOCVD method

Jeung-Hwan Lee, Won-Sok Lee, Jong-Hyun Lee, Sie-Young Choi
Tel : (053) 950-5518, Fax : (053) 950-5518, E-mail : cvdlab@hanmail.net
School of Electronic and Electrical Engineering, Kyungpook National University,
Taegu 702-701, Korea.

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.

I. 서론

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 소자를 서로 연결하는 배선 금속물질의 선폭이 미세해짐(0.25 μ m 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 원자들간의 상호충돌에 의해 전자의 일부 운동에너지가 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 Cu 가 많은 연구의 대상이 되어지고 있다.[3] 이는 Cu 가 Al보다 열적으로 안정하며 낮은 저항(1.68 μ Ωcm)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)이나 EM의 직접적인 요인이 driving force 에도 영향을 미친다.

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

where, 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 식 (2)와 같이 (111) 방향으로의 증착이 EM에 대해 높은 저항성을 가짐을 알 수가 있다.[5]

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

where, A : 결정립크기

σ : 이동 분포

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

where, 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)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.

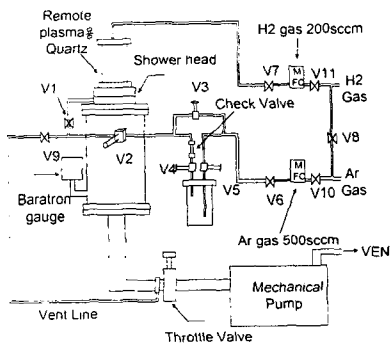


그림 1. Remote Plasma MOCVD 장비의 개략도.

II. 실험

본 연구에서 사용된 시편은 SiO₂/Si 위에 barrier layer로 TiN을 스퍼터링 방식으로 500 Å 증착 한 것이며 증착하기 전에 barrier layer와의 흡착력(adhesion)을 향상시키기 위해 전처리 과정으로 10분 정도 H₂ plasma를 이용하여 TiN표면을 세정하였다.[4] 그림 1은 본 연구에서 Cu 박막을 증착하

기 위한 MOCVD 장비를 나타낸 것인데, 이러한 전처리 과정을 진공에서 일괄처리하기 위해 반응기 위에는 inductively coupled plasma(ICP) 장치를 설치하였고, shower head는 H₂ 전처리 공정을 할 수 있도록 특수하게 제작하여 한 반응기 내에서 H₂ 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 1과 같은 박막 증착 조건을 알 수 있었다.

표 1. MOCVD Cu 박막의 증착조건.

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

그리고 위의 공정조건에서 증착된 Cu 박막의 특성을 표 2에 나타내었고, SEM 표면사진을 그림 3에 나타내었다. 본 연구에서는 이러한 동일한 특성을 가지는 Cu 박막을 증착하여 EM에 대한 특성을 조사하였다. Cu 패턴을 형성하기 위해 그림 3과 같은 공정을 행하여 길이는 2000µm, 각각의 선폭은 20µm, 10µm인 Cu 패턴을 형성하였다. EM의 측정은 대기 중에서 정전압/전류원을 이용하여 온도, 전류밀도 등과 같은 여러 조건에서 전압의 변화율을 측정하여 MTF와 활성화 에너지를 측정 및 분석하였다.

표 2. EM 측정에 사용된 Cu 박막의 특성

Resistivity (µΩ cm)	배향성 (111/200)	Grain size (Å)	Thickness (Å)
2.1	100/47.1	3200	3000

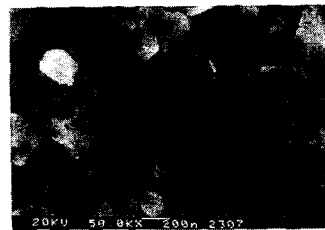


그림 2. Cu 박막의 SEM 표면사진.

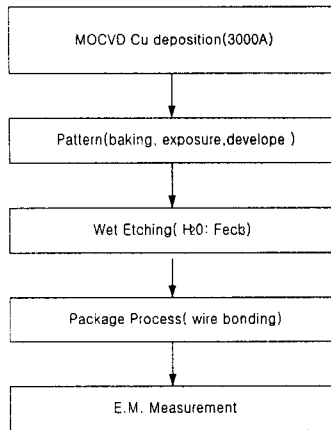


그림 3. EM 측정을 위한 Cu 패턴공정 순서.

III. 결과 및 고찰

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 두 가지 측정치에 대한 cumulative failure를 나타낸 것이다. 위의 두 결과로 저항이 높은 배선의 MTF가 27분 정도로 나타나는 반면 저항이 낮은 배선의 MTF가 90분 정도로 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 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.

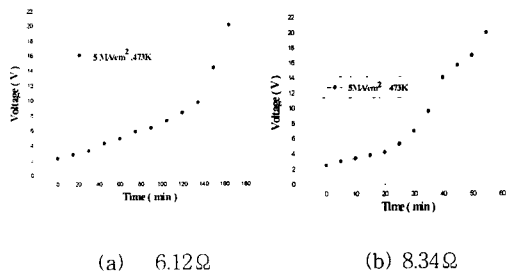


그림 4. 저항이 다른 배선의 시간에 따른 전압의 변화.

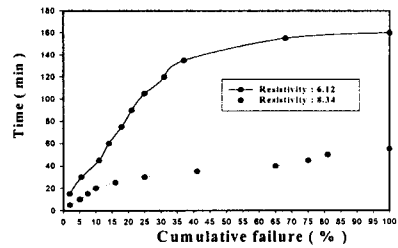


그림 5. 저항이 다른 배선의 cumulative failure.

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 수 있다. 이는 Cu 박막의 성질이 Al 박막보다 열적으로 안정함을 보여준다. 또한 같은 Cu 박막이라도 증착하는 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.

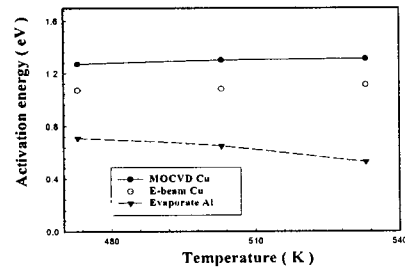


그림 6. 기판온도에 따른 활성화 에너지의 변화.

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 μm미만에서는 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 eV 로 선폭이 감소함에 따라 활성화 에너지 값이 MTF 값의 감소와 함께 줄어듦을 알 수가 있었다.

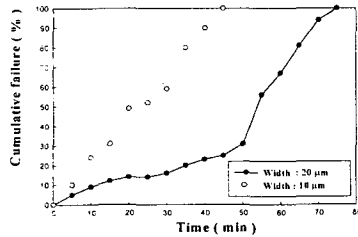
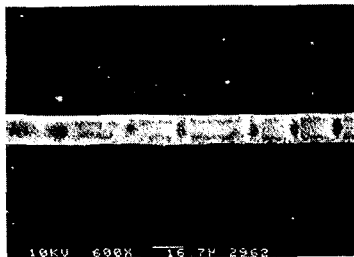


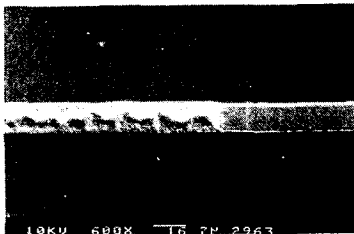
그림 7. 선폭의 변화에 따른 cumulative failure의 차이

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 가속화되어짐을 알 수가 있었다. 그림 8 (a)와 (b)는 EM 현상이 발생되어질 때 흔히 일어나는 대표적인 현상들인데 이는 음극 쪽에 원자들이 이동하여 양극 쪽으로 몰리는 현상들이다. (c), (d)는Cu 배선이 개방된 모습을 나타낸 것이다.



(a) depletion



(b) hillock



(c) Cu failure(crack)



(d) Cu failure(whisky)

그림 8. EM 발생시 일어나는 여러 현상.

IV. 결론

본 실험에서 미세구조에 의해 서로 다른 패턴 저항이 나왔을 때 저항이 낮은 배선에서 MTF 특성이 우수하게 나타났다. Cu와 Al을 비교해본 결과 Cu가 열적으로 안정함을 알 수 있었다. 또한 증착방법에 따라 같은 물질이라도 다른 EM 특성을 나타내었으며 선폭의 감소에 따라 활성화 에너지가 감소함을 알 수가 있었다.

참고 문헌

- [1] James R. Black, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-16 p338 (1969).
- [2] C. V. Thompson and J. R Lloyd, *Mater. Res. Bull.* 18, p19 (1993)
- [3] J. Tao, N. W. Cheung, C. Hu, *IEEE Electron Device Lett.* 14, p249, (1993)
- [4] 이종현, 이정환, 최시영, 16회 진공학회 학술 발표회 p79, (1999)
- [5] C. Ryu, A. L. S. Loke, T. Nogami and S. S. Wong, *IEEE Int. Rel. Phys. Symp. Proc.* p201, (1997)