

MOCVD Copper 박막의 열처리가 Electromigration 특성에 미치는 영향 연구

이원석* · 배성찬 · 손승현 · 최시영

경북대학교 전자·전기·컴퓨터학부
(논문접수일 : 2001년 4월 27일)

The effect of the heat treatment of MOCVD Cu thin film on electromigration

Won-Sok Lee†, Seong Chan Bae, Seung Hyun Son, and Sie Young Choi.

School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University, Taegu 702-701, Korea

(Received April 27, 2001)

요 약

MOCVD(metal-organic chemical vapor deposition) Cu 박막을 여러 조건에서 열처리를 행하여 그 전기적 특성과 미세구조의 변화를 통해 적절한 열처리 조건을 찾고 그 효과를 조사하였다. Ar 1 torr, 400 °C에서 열처리를 거친 Cu 박막의 비저항이 $1.98 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 로 가장 낮게 나타났으며, 결정성의 경우도 $I_{(111)}/I_{(200)}$ 의 비가 2.03에서 3.11로 열처리를 거치지 않았을 경우와 비교해서 약 50 % 정도 향상된 값을 나타내었다. 열처리 후의 electromigration(EM) 테스트에서는 Ar 1 torr, 400 °C에서 열처리를 거친 배선이 EM에 대한 가장 높은 저항성을 보였다. 이것은 열처리 후 낮은 비저항, (111) 결정면의 성장, 그리고 표면 거칠기의 감소에서 기인한 것이다.

Abstract

MOCVD(metal-organic chemical vapor deposition) copper thin film was annealed at various conditions and the electrical properties and micro-structures were investigated to find the optimal annealing condition and its effect. Cu thin film annealed at Ar 1 torr, 400 °C had the most improved resistivity of $1.98 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, and texture; the ratio of $I_{(111)}/I_{(200)}$ was varied from 2.03 to 3.11, and Cu thin film annealed at Ar 1 torr, 450 °C had the largest grain size and uniformity. After the annealing, the EM(electromigration) test was followed to ensure the improved properties by annealing. Compare to other conditions, Cu patterns annealed at Ar 1 torr, 400 °C had the most improved properties when it came to the EM resistance, which was due to the low resistivity, the preferential evolution of texture to (111) plane, and the reduction of surface roughness of annealed copper film.

1. 서 론

반도체소자의 고집적화에 따른 소자크기의 감소로 인해서 금속배선의 최소 선폭은 점차 감소되고 배선에 인가되는 전류밀도는 급속히 증가되고있다. 이에 따라 RC 지연시간의 증가와 electromigration(EM)과

관련된 신뢰도가 중요한 문제로 제기되고 있다 [1,2]. 선폭이 감소되면 측면에서의 정전용량(sidewall capacitance)이 급격히 증가되면서 RC 시정수가 증가하게 된다. 따라서 이러한 RC 시정수를 감소시키기 위해서 층간절연막의 유전율(ϵ)과 배선의 비저항(ρ)를 감소시키기 위해 polyimide 등 낮은 유전율을 가지

† E-mail : pecvd@hanmail.net

는 층간 절연막 개발과 Cu와 같은 낮은 비저항의 금속물질이 연구되기 시작했다 [3,4]. 특히 저항은 회로의 속도뿐만 아니라, 회로 동작중의 열 발생이나 EM에 의한 원자의 이동 등 다른 부가적인 현상에서도 중요한 역할을 한다.

따라서 낮은 비저항의 금속 물질에 관한 연구는 고집적 반도체의 배선공정에서 매우 중요한 분야가 된다. 종래에는 비교적 낮은 비저항($2.65 \Omega \cdot \text{cm}$)과 공정의 용이성 등의 이유로 Al 및 그 합금이 배선 재료로 사용되었지만 이는 1 GB 이상의 소자를 구현하는데는 부적합하다 [5]. Cu는 Al에 비해 우수한 전기전도도($1.67 \mu\Omega \cdot \text{cm}$)와 높은 녹는 점($1083 \text{ }^\circ\text{C}$)을 가지며 EM에 대한 내성은 약 1000 배 정도 강한 물질로 알려져 있으며, 현재 배선재료로 Cu를 사용하기 위해 해결해야 할 몇 가지 문제점들에 대한 연구가 진행 중에 있다. 그러나 아직까지 EM 자체에 대한 연구와 EM 특성에 가장 큰 영향을 미치는 비저항, 배향성 등의 개선을 위한 열처리의 경우는 복잡한 메카니즘 등의 이유로 적합한 조건이 확립되지 않은 상태이다.

EM은 배선 내부를 지나는 고밀도의 전자들과 배선 금속 원자들간의 상호작용에 의하여 전자의 일부 운동에너지가 금속원자에게 주어져 에너지를 받은 배선의 금속원자들이 이동하는 현상을 말한다 [6]. 이러한 배선원자의 이동이 장시간 진행될 경우 배선의 저항증가와 공극(void), 균열(crack) 등의 결함이 발생하여 배선의 RC 지연시간이 증가되고 결국 배선 파괴에까지 이를 수 있다. 이는 반도체 칩 내부를 구성하는 일부소자들만의 파괴를 의미하는 것이 아니라 반도체 칩 전체의 기능 상실을 초래하는 것으로 회로의 더 높은 고집적화에 대응하여 꼭 연구 보완되어야 할 필수적인 과제이다. Cu 박막의 적절한 열처리는 EM 저항성에 큰 영향을 미치는 금속의 비저항 개선과 박막의 미세구조의 개선에 큰 효과가 있을 것으로 기대된다 [7].

본 연구에서는 MOCVD(metal organic chemical vapor deposition)법으로 성장한 Cu 박막을 온도별, 시간별, 분위기 가스의 유무 등 여러 가지 조건에서 열처리를 수행하여 EM의 주요인자인 비저항, 입자의 크기와 균일성, 배향성 등의 특성 평가를 통하여 열처리의 가장 적합한 조건을 찾고자 하였다. EM 인자

들의 특성 확인을 위해서는 4 탐침법(four point probe), AFM(atomic force microscopy), SEM(scanning electron microscopy), XRD(X-ray diffraction) 등이 이용되었으며, EM 테스트를 통하여 EM 특성에 영향을 미치는 인자들의 변화에 따른 EM 저항성의 향상정도를 비교 분석하여 적절한 열처리 조건을 확립하였다.

2. 실험

2.1 MOCVD Cu 기판의 열처리

사용된 기판은 8" p-type (100) Si wafer 위에 TiN 1000 Å을 스퍼터링으로 형성하고 아세톤, 메탄올, D.I. water 순으로 초기 세척공정을 행한 후 MOCVD 방법으로 2000 Å의 Cu를 형성시킨 Cu/TiN/Si 구조이다. 이 기판은 공기 중에서의 Cu 박막의 산화를 막기 위해서 진공용기중에 보관하였다. 이 기판을 $1.5 \times 1.5 \text{ cm}$ 로 잘라 진공 열처리기에서 표 1과 같은 여러 가지 조건에서 열처리를 행하였다.

열처리 온도에 따르는 비저항의 변화를 알아보기 위하여 가장 적절할 것으로 판단되는 $350 \sim 450 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 간격으로 각각 행하였으며, 온도의 상승은 $15 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 으로 비교적 저속으로 설정하였으며 열처리 시간은 설정온도 도달시점부터 적용되었다. 열처리가 끝난 후에는 진공을 유지하며 노냉하였다.

본 연구에서 중요한 변수들은 열처리 온도, 분위기 가스의 유무, 열처리 시간이었으며 이러한 변화들에 따른 Cu 박막의 특성 변화를 조사하기 위하여 열처리 전후의 비저항, 미세구조의 변화, 배향성 등이 검토되었으며 EM 테스트를 통하여 열처리의 효과를 측정해 보았다.

열처리 전후의 저항률을 측정하기 위해서 4 탐침법을 이용하였고 막의 미세구조와 단면의 두께를

Table 1. Annealing Conditions of Cu thin film.

Parameters	Values
Temperature. ($^\circ\text{C}$)	350, 375, 400, 425, 450
Time (min)	30, 60, 180
Base pressure (Torr)	10^{-3}
Ar pressure(Torr)	1

측정하기 위해서는 AFM과 SEM을 이용하였고 배향성을 조사하기 위해서는 XRD를 이용하였다.

2.2 Electromigration 테스트

Cu 박막을 여러 조건에서 열처리한 후 EM 테스트를 통해 EM 저항성의 향상정도를 측정해 보았다. 이때 사용한 PR은 AZ1512 positive PR이었고 가장 적절한 조건으로 판단되는 Soft baking (90 °C, 9 min), Hard baking (90 °C, 10 min)을 수행하였다. Cu의 식각에는 CH₃COOH : H₂O₂ : H₂O=10 : 1 : 1을 사용하였고 PR스트립은 Cu의 손상을 막기 위해 positive PR 스트립과 대신 아세톤에서 행하였다.

그림 1은 EM 측정에 사용된 패턴의 구조이다. 선폭은 20 μm, 길이는 2000 μm로 설계하였으며, 패턴의 전체 저항은 15 Ω으로 측정되었다. 그리고 음극 쪽에는 급속한 전류의 충격을 줄이기 위하여 버퍼층을 넣어 설계하였으며, EM 테스트는 고순도 Ar 1 기압의 조건에서 행하였다.

테스트 시의 주변온도는 100 °C에서 실시되었고 기준 전류밀도는 8 MA/cm²로 설정하였다. 전류의 인가는 HP사의 E3611A를 사용하였다. 측정시간은 180분으로 하였으며 측정 방법은 개방시간을 측정하는 life time test 대신 저항증가율의 linear regression으로 구하였다.

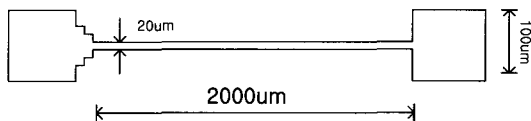


Fig. 1. Cu pattern for the electromigration measurement.

3. 결과 및 고찰

3.1 열처리 Cu 박막의 물리적 특성

열처리의 온도별 특성을 알아보기 위하여 350~450 °C의 범위에서 열처리를 하였다. Cu와 관련된 연구들의 경우 박막의 특성을 향상시키기 위해 낮게는 225 °C에서부터 높게는 450 °C의 온도에서 열처리를 행하였으며, 시간은 2 분에서부터 24 시간

정도로 넓은 분포를 보여 지금까지 Cu 박막의 열처리에 대한 최적의 조건은 정립되지 않은 상태이다.

그림 2는 열처리 온도에 따르는 비저항의 변화를 나타내었다. 박막의 비저항은 박막 미세구조에 있어 결정립의 크기가 크고 고르며, void가 적을수록 낮은 값을 가진다. 따라서 비저항은 미세구조 변화의 중요한 척도이며 EM 현상은 이 비저항 값의 변화에 가장 큰 영향을 받는다. 진공에서의 경우와 Ar 분위기 모두 400 °C에서 가장 향상된 값을 나타내었다. 비저항의 향상은 온도에 대해 뚜렷한 경향성을 가지며 진공에서에 비해 Ar 분위기에서 열전달이 잘 이루어지므로 보다 향상된 값을 가짐을 알 수 있다. 열처리 시간에 대한 경향성을 확인하기 위하여 Ar 1 torr 400 °C의 온도에서 30 분, 1 시간, 3 시간 동안 열처리를 행하였다. 그림 3에서 보는 바와

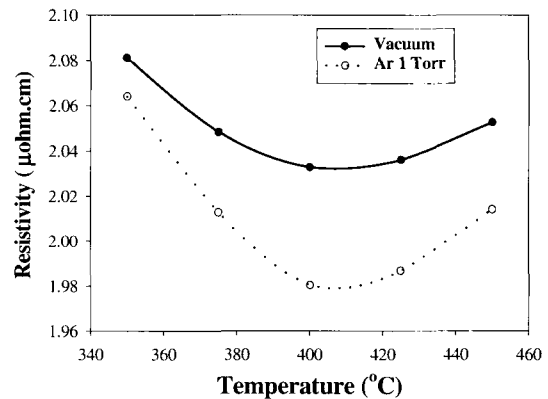


Fig. 2. Resistivity improvements of Cu thin films annealed for 30 min at various temperatures.

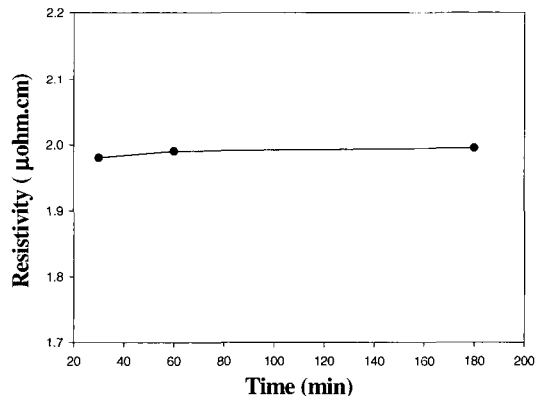


Fig. 3. Resistivity improvements of Cu thin films annealed at various times. (at Ar 1 torr and 400°C)

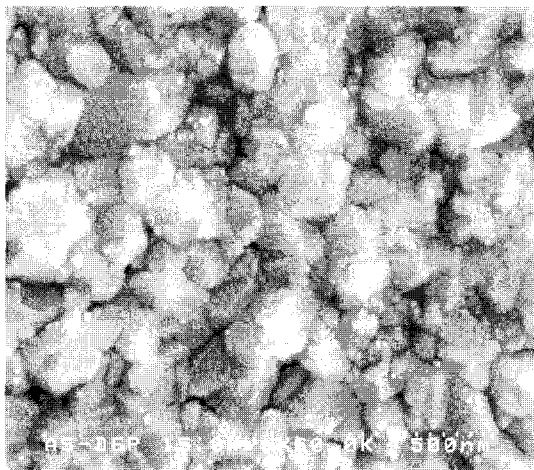
같이 비저항 특성이 시간에 대해서는 큰 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

결정립의 모양은 그림 4에서와 같이 초기 열처리 이전의 박막의 경우 각진 형태임을 관찰할 수 있고, 350 °C 정도에 이르면 둥근 모양으로 바뀌며 온도가 더 높아지면 작고 둥근 결정립들이 뭉쳐짐을 알 수 있었으며 400 °C와 450 °C에서의 결정립의 크기와 분포는 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 그림 5에서와 같이 열처리 이전의 박막과 Ar 분위기 450 °C 열처리를 거친 Cu 박막의 단면에서는 열처리를 거치면 현저하게 평탄화 됨을 알 수 있었고, 전체적 두께는 큰 변화가 없음을 알 수 있

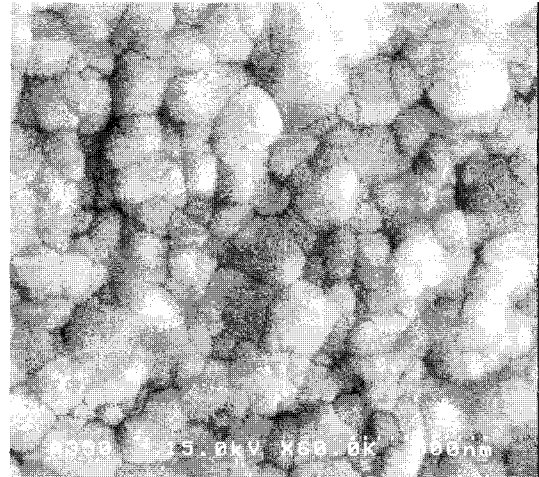
었다.

조건별 배향성의 변화를 알아보기 위하여 XRD로 배향성의 변화를 비교해 보았다. Cu 배향성에 있어서 (111) 방향은 (200)에 비해서 EM 저항성이 우수하다. 이는 (200) 방향의 박막에 비해 (111) 방향의 배향성의 박막의 경우 barrier 박막에 평행한 성분이 많기 때문이다. 실험 결과에서 배향성은 열처리를 거친 경우 전체적으로 향상된 값을 나타내었으며, 그림 6에서와 같이 Ar 1 torr, 400 °C에서 $I_{(111)}/I_{(200)}$ 값은 2.03에서 3.11로 50 % 정도 향상된 값을 나타내었다.

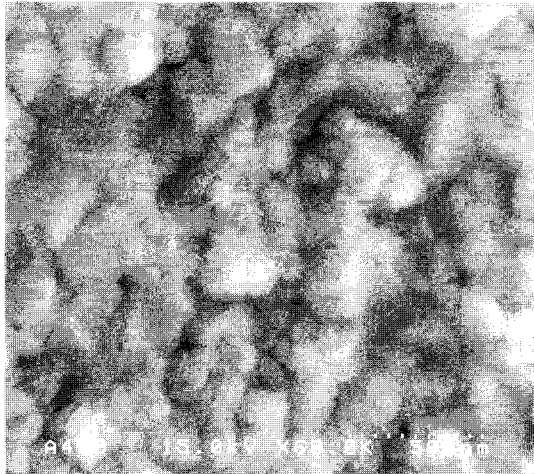
박막의 평탄도를 알아보기 위하여 AFM을 측정



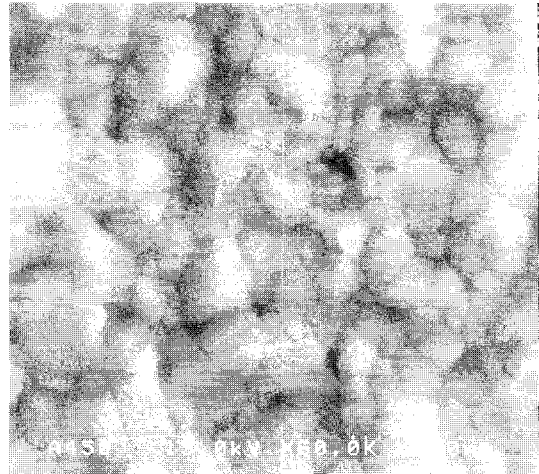
(a) as dep.



(b) 350 °C



(c) 400 °C



(d) 450 °C

Fig. 4. SEM photographs of Cu surface annealed at Ar 1 torr for 30 min.

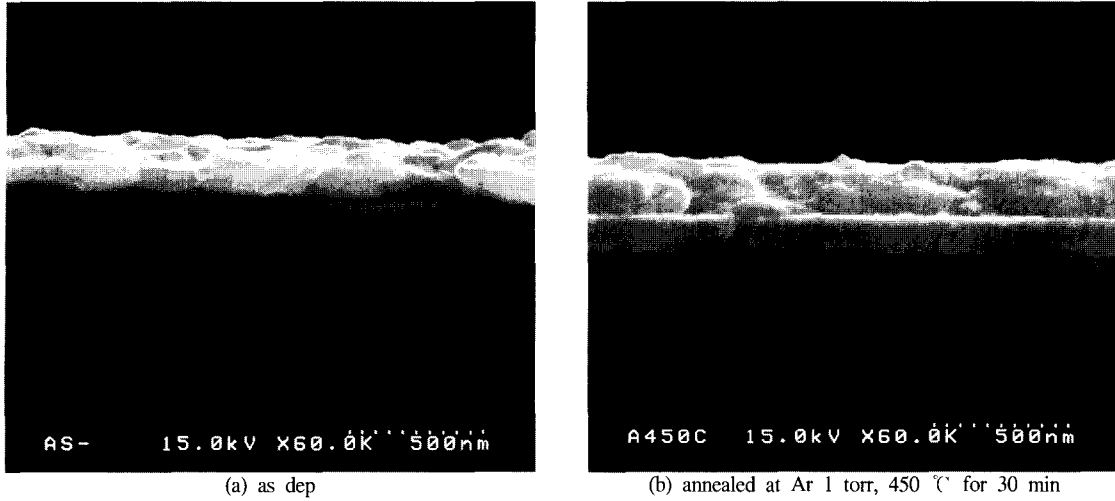


Fig. 5. SEM cross-sectional views of Cu thin films.

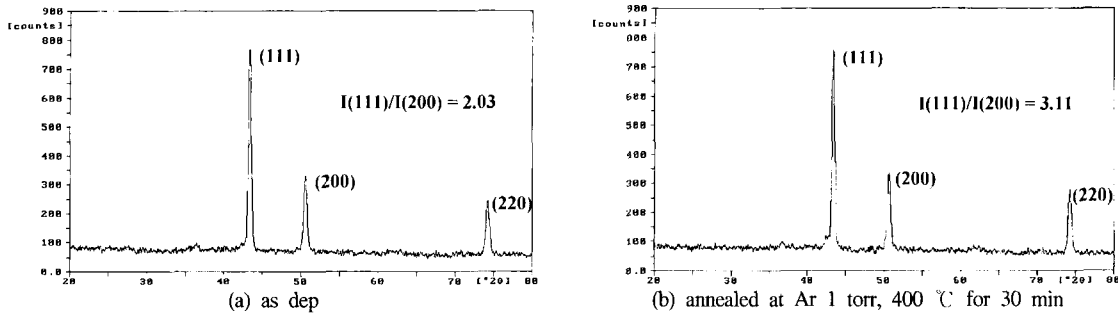


Fig. 6. XRD pattern of the Cu thin films.

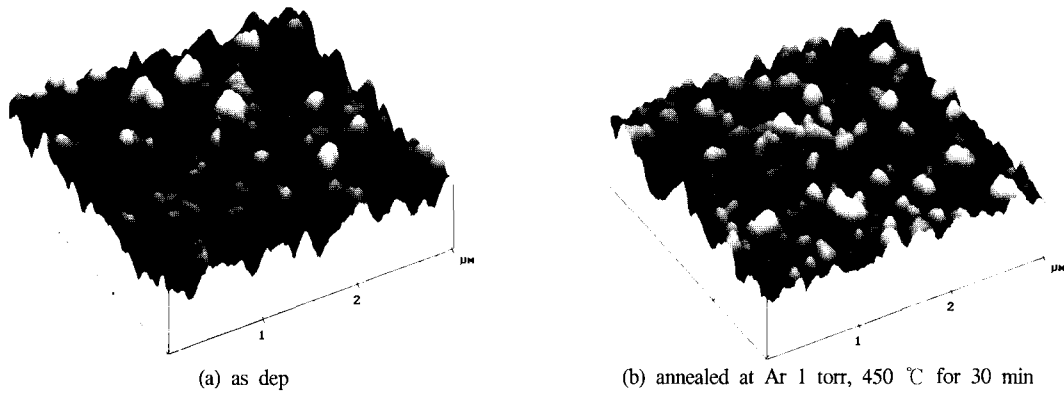


Fig. 7. Three-dimensional AFM results of the Cu thin film.

하였다. 그림 7의 3차원 AFM 이미지는 서로 비교에 어려움이 있으므로 비교는 표 2의 AFM 데이터값을 이용하였다. 평탄도는 온도가 높아짐에 따라 향상

되었으며 Ar 분위기의 450 °C 열처리에서 $Img. Rms$ 데이터를 기준으로 13.27 %의 가장 큰 향상을 나타내었다.

Table 2. AFM data of Cu thin films at various annealing conditions.

Atmosphere (torr)	Annealing temp.	Img. Raw mean (nm)	Img. Rms (Rq) (nm)	Img. Rmax (nm)
as dep.	×	8.119	20.905	131.29
10 ³	350 °C	14.798	19.261	134.61
	400 °C	-0.094	18.228	126.07
	450 °C	3.564	18.652	121.92
Ar 1	350 °C	4.179	18.565	126.50
	400 °C	1.371	18.674	130.23
	450 °C	10.665	18.125	125.66

where, Img. Raw mean : Raw mean of surface roughness before surface correction.
 Img. Rms(Rq) : Rms mean of surface roughness after surface correction.
 Img. Rmax : maximum difference in height within scanned image area.

3.2 열처리 Cu박막의 electromigration 특성

저항의 증가는 전류인가 후 10 분 이내에서 가장 뚜렷이 나타났으며 10 분 이후부터는 Cu 박막의 농도경사와 응력의 축적에 의한 healing 효과로 해서 저항의 증가가 완만해지는 것을 알 수 있었다.

열처리 온도별 EM 저항성 향상의 정도를 알아보기 위하여 전류밀도 8 MA/cm², 주변온도 100 °C에서 180 분간 저항변화를 측정하였다. 그림 8에서 보는 바와 같이 400 °C에서 열처리 한 Cu 박막이 가장 우수한 특성을 나타내었다. EM 특성에 가장 중요한 영향을 미치는 요소들을 비교해 보았을 때 박막의 비저항과 배향성에서는 400 °C에서 열처리를 한 결과가 가장 좋게 나타났으며, 결정립의 크기와

균일성, 평탄도에서는 450 °C에서의 열처리가 가장 우수한 것으로 나타났다. 따라서 EM 저항성 면에서는 400 °C에서 열처리한 박막과 450 °C에서 열처리 한 박막이 거의 비슷한 결과가 나타난 것으로 보인다. 열처리를 거치지 않은 박막과 각각의 온도에서 열처리를 거친 박막의 저항 증가의 기울기는 큰 차이가 없다는 것으로 나타났으며 대부분의 저항 증가의 차이는 전류인가 초기에 나타났다. 이는 그림 4에서 볼 수 있듯이 열처리 이전의 Cu 박막은 작은 결정립과 많은 void를 가지지만 적절한 열처리를 거치는 경우 크고 균일한 결정립을 가지고 결정결함이 줄어들기 때문이다.

여러 온도별 EM 테스트에서 가장 우수한 결과로 나온 Ar 1 torr, 400 °C에서 열처리한 박막을 열처리

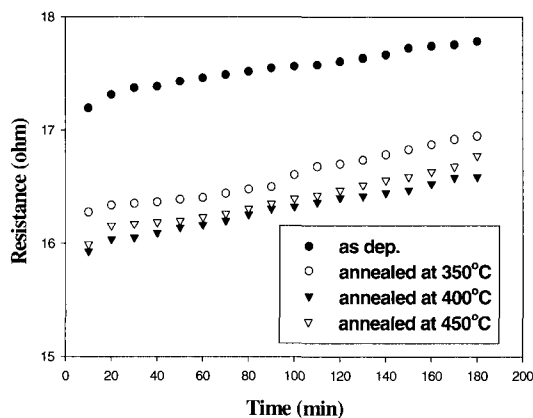


Fig. 8. Resistance variations of Cu pattern annealed at various temperatures.

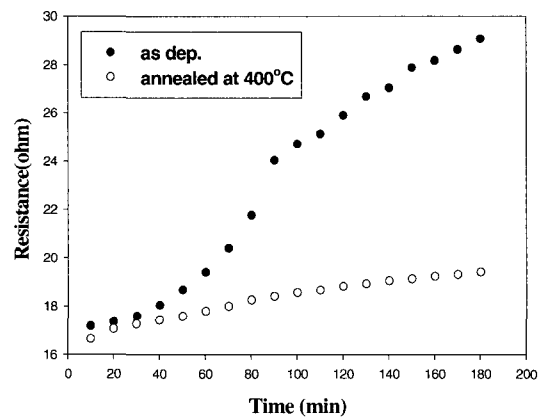


Fig. 9. Resistance variations of as-deposited and annealed at Ar 1 torr, 400 °C Cu pattern at the temperature of 200 °C.

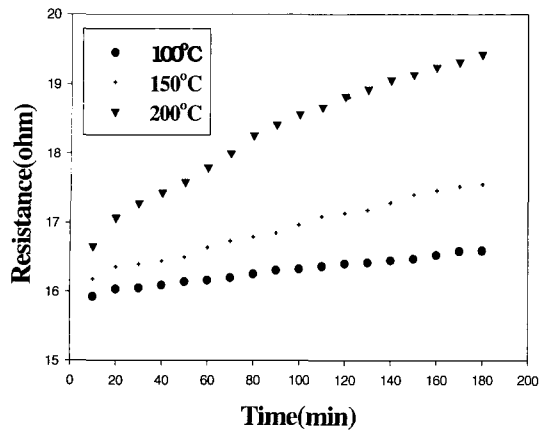


Fig. 10. Resistance variations of annealed at Ar 1 torr, 400 °C Cu pattern at various temperatures.

하기 이전의 박막과 주변온도 200 °C의 조건에서 EM 저항성을 비교해 보았다. 그림 8의 100 °C에서의 테스트 결과에서는 저항증가의 기울기가 큰 차이를 보이지 않았지만 그림 9의 200 °C에서의 테스트 결과에서는 큰 차이를 나타냄을 알 수 있다. 이는 열처리를 거친 경우 고온에서의 EM 저항성이 더 크게 향상됨을 보여주는 것으로 박막의 void와 삼중점의 수가 줄어들므로 결정립 계로의 확산경로가 줄어들어 주울열의 발생이 적어지며 확산은 주로 표면을 통해서 이루어지기 때문인 것으로 여겨진다.

그림 10은 Ar 1 torr, 400 °C에서 열처리를 거친 Cu 박막을 이용하여 온도를 100 °C, 150 °C, 200 °C, 전류밀도를 8 MA/cm² 인가하였을 경우 저항 증가율을 측정된 결과이다. 모든 온도에서 열처리를 거치지 않은 박막에 비해 우수한 결과를 나타내었다.

4. 결 론

MOCVD 방법으로 증착한 2000 Å Cu 박막을 온

도별(350~450 °C), 시간별(30~180 min), 분위기 가스(Ar)의 유무 등 여러 조건에서의 열처리를 하여 Electromigration 특성에 영향을 미치는 주요인자들에 대한 향상의 정도를 비교하였다.

비저항과 배향성 면에서는 Ar 1 torr, 400 °C에서 열처리를 거친 Cu 박막이 가장 좋은 특성을 보였으며, 결정립의 크기와 균일성에서는 Ar 1 torr, 450 °C에서 가장 향상된 특성을 나타내었다.

열처리 조건별 Electromigration 저항성은 Ar 1 torr, 400 °C에서 열처리를 거친 박막이 가장 좋은 것으로 나타났다. 본 연구의 결과들을 종합해 보았을 때 금속배선용 Cu 박막의 Electromigration 특성 향상을 위한 열처리는 불활성가스 분위기, 400 °C에서 행해짐이 가장 적합함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Ronald J. Gutmann, T. Paul Crow, Alain E. Kaloyeros, William A. Lanford, Shyam P. Muraka, *Thin Solid Films* **262**, 177 (1995).
- [2] D. S. Gardner, J. D. Meindl and K. C. Saraswat, *IEEE Trans. Electron Devices* **34**, 633 (1987).
- [3] J. M. Neiryneck, R. J. Gutmann, and S. P. Murarka, *Journal of The Electrochemical Society* **46**, 1602 (1999).
- [4] J. R. Lloyd, J. J. Clement, *Applied Physics Letter* **69**, 2486 (1996).
- [5] Changsup Ryu, Kee-won Kwon, *IEEE Transactions on Electron Devices* **46**, 1113 (1999).
- [6] A. Dasgupta, M. Pecht, *IEEE Trans. Reliability* **40**, 531 (1991).
- [7] C. S. Hau-Riege and C. V. Thompson, *Applied Physics Letters* **77**, 352 (2000).