

論文93-30A-6-1

# 이중 결정립 구조 1% Si-Al 금속선에 의한 Migration 수명의 개선

## (Improvement of Migration Lifetime by Dual-sized Grain Structure in 1% Si-Al Metal Line)

金榮出\*, 金鐵柱\*

(Yeong Choul Kim and Chul Ju Kim)

### 要約

1%Si-Al 금속배선에 얇은 산화막을 형성시킨 다음 single charged argon(Ar+)을 이온 주입하면 금속선 표면의 입자들이 비정질(amorphous)화되어 결정립의 크기(grain size)가 줄어들고, 거칠은 표면이 평탄화되었다. 이온 주입은 금속 표면에만 영향을 미치게 되어 금속 표면을 제외한 다른부분의 금속층은 저항이 낮은 큰 결정립 상태를 유지하였다. 이 금속선의 결정내부에는 이중 결정립 구조(dual-sized grain structure)가 형성되며, 본 구조가 응력을 완화시켜 SM(stress migration)에, 저항이 낮아 EM(electromigration)에 대한 내구성을 향상시킴을 알았다. 금속선의 수명은 약 7배, 불량 분포를 나타내는 표준 편차는 약 2배 정도 개선되었다.

### Abstract

After the 1%Si-Al metal is deposited, a thin oxide layer is formed thereon. Then, a single charged Argon(Ar+) is ion implanted into the oxide layer, thereby causing the metal grain in the upper surface of the metal layer to become amorphous. Consequently, the grain size will be reduced and the rough surface of the metal layer flattened. However, the remainder of the metal layer beneath the upper surface thereof will still exhibit large grain size and low resistance, because the Argon ion is only implanted to the depth of the upper surface of the metal layer. The metal line thus will be characterized by a dual-sized grain structure which served to reduce interlayer stress, thereby decreasing the rate of stress migration, and to lower the resistivity of the metal line, thereby enhancing the electromigration characteristic thereof. Experiments have shown that the metal line exhibits a metal migration rate which is approximately 700% less than the control group and a standard deviation which is approximately 200% less than these group.

### 1. 서론

正會員, 서울시立大學校 電子工學科  
(Dept. of Elec. Eng., Seoul City Univ.)  
接受日字: 1992年 6月 26日

EM(electromigration)과 SM(stress migration) 불량은 고 전류 밀도를 갖는 IC의 신뢰성에 치명적인 영향을 주게 되므로 이에 대한 연구가 활발히

진행되고 있다. Al 배선은 고온에 방치해 두거나 전류를 가해 주면 Void와 Hillock이 배선내에 생성되면서 Migration 불량을 일으킨다. 이러한 불량은 Al 배선에 인가된 응력을 완화시키기 위해 계의 자유 에너지가 최소가 되는 방향으로 Al 원자와 공격자(vacancy)가 확산되는 현상에 의한 Al 배선의 단선 현상으로 나타난다. 즉 Al 배선에서 (111)면에 평행하게 서로 마주보는 결정립(grain)계로 공격자가 확산되어 결정립계에 삼각형 또는 Slit상의 결함을 성장시켜 단선을 유발하는 SM<sup>[1]</sup> 과 전류의 흐름에 의해 전자들이 Al 원자들과 충돌하여 발생하는 역학변환(momentum exchange)으로 인하여 Al 원자가 이동함에 따라 Al 배선내에 void 나 hillock이 형성되면서 도체가 단선되는 EM<sup>[2]</sup> 으로 구분 할 수 있다.

EM과 SM은 결정립의 크기와 균일성<sup>[3]</sup>, 보호막의 막질<sup>[4]</sup>, Al 배선의 재질<sup>[5]</sup>, step coverage<sup>[6]</sup>, Al 증착시의 잔류 개스 및 Si 석출물등에 의해 그 수명이 좌우된다. 그러나 상기 요소들은 서로 연관된 교호작용으로 인해 완벽한 조건을 얻기는 매우 어려운 일이다. 따라서 가장 좋은 조건을 구하기 위해 공정조건외의 변경, 금속 재질의 변경등 많은 연구가 진행되고 있다. 그중 Al결정립의 크기에 대한 연구는 가장 오랜 역사를 지니며 그럼에도 불구하고 명쾌한 해답을 얻지 못하고 있다. 그것은 Al 배선의 결정립 크기가 증가하면 저온 확산의 통로수가 감소되어 입계 확산의 주원인인 EM의 수명은 상대적으로 증가시킬 수 있으나, 결정립 크기의 증가로 인한 입자 분포의 불균일, 상하 절연막과의 응력차의 증가등으로 인해 SM에 약해져서 표준편차가 증가하며 종합적인 수명에 악영향을 미치기 때문이다.

본 논문에서는 결정립의 크기를 증가시켜 저온 확산의 통로수를 감소시키는 반면에 입자 분포의 균일화, 상하 절연막과의 응력차를 최소화할 수 있는 Al 형성방법을 개발하여 Al 배선의 EM과 SM에 대한 내구성을 증가시키는 방법을 제안하였다. 이 방법은 단일 Al층 내부에 이온 주입을 이용하여 결정립 크기에 변화를 주어서 하부의 큰 결정립을 가진층은 저온 확산 통로수의 감소에 기여케 하는 것이다. 반면에 상부의 작은 결정립을 가진 층은 절연막 또는 보호막과의 응력차를 줄이는데 기여케 하는 단일층 이중 결정립 구조(dual-sized grain structure)의 Al 배선을 형성시키는 방법이다.

II. 실험 방법

본 실험에서 사용된 시료는 field oxide, poly step이 포함된 topology가 있는 MOS 제품에 대해

Al 증착 조건 및 전후 처리공정에 따라 분류, 제작되었으며 상세한 시료의 공정도를 그림 1에 보였다. 전기 전도도와 내습성에 우수한 1% Si-Al 재질의 이중 결정립계 구조를 갖는 Al 배선을 형성시키기 위한 제조 공정은 다음과 같다. poly-Si 위에 PSG (Phospho-Silicate Glass)막을 형성시킨후 steam flow를 실시한다. 그 위에 350 ℃에서 1% Si-Al을 증착시킨다. Al 증착이 끝난후 LTO(Low Temperature Oxidation) 방식으로 산화막을 280Å 성장시킨다. 이렇게 하여 형성된 산화막위에 single charged argon ion(Ar+)을 이용하여 이온 주입을 실시한다. 이때의 가속 에너지는 약 30keV이고 flux는 약  $6 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ 이다. Ar+의 주입은 산화막을 통해 Al 위의 표면까지 도달되며 그 결과 Al의 표층

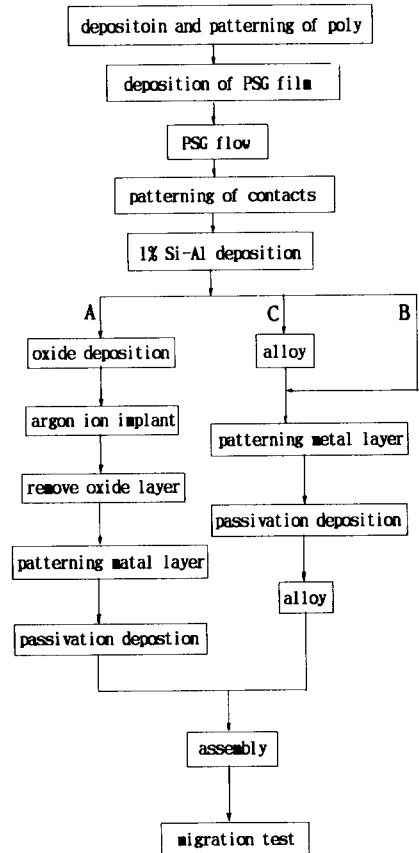


그림 1. Migration 실험 시료의 공정도  
Fig. 1 Process steps for migration test samples.

이 비정질(amorphous)화되어 결정립의 크기(grain size)가 작아지면서 표면상태가 평탄화된다. 그후 산하막을 제거하고 보호막 증착 공정을 진행한다. 이 실험에 사용된 시료의 구조는 그림 2와 같다. 공정 진행후 Al 배선의 특성을 분석하면 큰 결정립의 Al층 위에 작은 크기의 결정립이 형성되는 단일층의 이중 결정립 구조를 갖는 Al 배선이 형성됨을 알 수 있다.

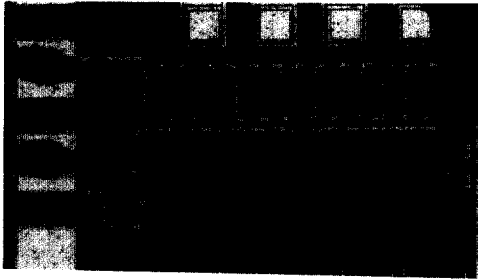


그림 2. Migration 실험 시료의 칩 사진  
Fig. 2. Photograph of Migration test chip.

Migration의 테스트장치로서는 auto metal migration system (Micro-instrument Co.)을 사용하였으며 가속 계수차에 의한 불량 산포를 줄이기 위해 동일 조건에서 테스트를 진행하였다. 가속시험의 원리는 반응론 모델에 입각하여 모집단을 추정하였으며 공정조건에 따른 시료 크기는 30units 씩 추출하였다. 상세한 시험 조건과 회로는 그림 3과 같다. 또한 결정립의 관찰과 결정립 크기의 측정에는  $\alpha$ -step(금속 표면 측정 설비)과 SEM을 이용하였다.

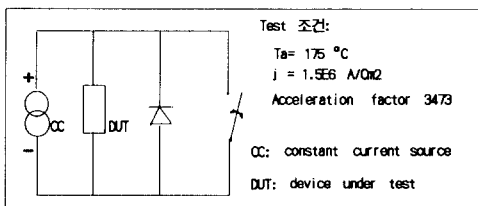


그림 3. Migration 실험 조건과 회로  
Fig. 3. Migration test condition and circuit.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 공정 조건에 따른 수명 비교 분석

Migration에 대한 내구성은 MTF(Median Time to Failure)와 표준편차(standard deviation)에 의해 평가되며 이들은 정규분포를 따르는 것으로 평가되고 있다. MTF는 일반적으로 다음식과 같이 표현된다<sup>[7]</sup>

$$\begin{aligned}
 MTF(t_{50}) &= \frac{A}{J^n} \exp\left(\frac{Ea}{kT}\right) \\
 &= \frac{Kwt}{J^n D_0 l} \exp\left(\frac{Ea}{kT}\right) \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서  $t_{50}$ 은 50% 불량 발생 시간, A는 Metal line의 구조와 상태에 따라 결정되는 상수, T는 절대 온도, J는 전류 밀도, n은 전류 밀도 지수, k는 볼츠만 상수,  $D_0$ 는 금속선의 확산 계수, w, t 및 l은 각각 Al 배선의 폭, 두께 및 길이로서 aspect ratio가 0.5 이하의 낮은 값을 갖는다. 지수 n은 적정 온도에서 열을 잘 방출하는 배선의 경우 1, 고 전류 밀도에서 열을 잘 방출하지 못하는 배선의 경우에는 2-3, 그리고 매우 높은 전류 밀도에서는 10-15의 값을 갖는다. K는 불량원인에 따른 상수로서 이것은 높은 J와 T에서 가속 수명 시험을 실시할 때 표준 동작 조건에서 금속배선의 수명을 추정할 수 있게 하는 근거를 제공하는 요소이다. 표준 편차는 분포곡선의 기울기에 의해 계산되는데 독립적인 불량원인의 수가 증가함에 따라 그 값은 증가한다. 실제의 경우 MTF의 값이 크더라도 표준편차가 크면 MTF의 값이 다소 낮더라도 표준편차가 매우 작은 경우에 비해 신뢰성이 나쁘다고 할 수 있다. 불량 분포의 모양을 나타내는 표준 편차는 다음식으로 주어진다<sup>[8]</sup>

$$\sigma = \ln \frac{t_{50}}{t_{16}} \quad (2)$$

식(1)과 (2)의 통계적 접근 방법을 토대로 본 연구의 신규 공정에 대한 수명을 기존공정과 비교분석한 결과를 표 1에 보였다. 이중 결정립의 Al 배선과 단층 구조에서 Al 증착 온도가 300 °C, 350 °C일때의 MTF와 표준편차 값을 보인것이다. 단층 구조에서 Al 증착 온도가 350 °C일 때 보다 300 °C 전후에서 열처리 했을 때가 MTF는 2.2배로 증가되며, 이중 결정립 구조에서는 7배로 증가함을 알 수 있다. 또한 표준편차 값은 이중 결정립에서 1/2로 줄어들어 불량 분포가 2배로 균일함을 보였다. 그림 4에는 표 1에서 보인 시료조건 A, B, C의 불량분포에 대한 불량시간과의 관계를 보였다. 그림에서 알 수 있듯이 초기 불량 시간이 100배 가량 향상되었다.

표 1. 각 공정조건에서의 Migration 수명 및 표준편차 비교

Table 1. Comparison of migration lifetime and standard deviation in various process conditions.

condition \ sample	A	B	C
결정구조	DUAL	SINGLE	SINGLE
Metal deposition temperature	350 °C	350 °C	300 °C
Alloy process	X	after	before/after
Oxide deposition	0	X	X
Ar <sup>+</sup> ion implant	0	X	X
Passivation	0	0	0
MTF(experimental)	2784	396	834
Standard deviation	0.492	1.029	0.859

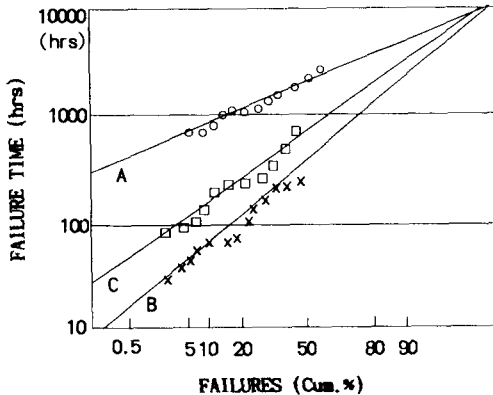


그림 4. 각 공정조건에서의 불량시간 분포  
Fig. 4. Distribution of failure time in various process conditions.

2. 결정립의 크기에 따른 분석

결정립의 크기는 Al 증착 온도에 비례하였다. 상온에서는 약 0.7-0.8 μm의 평균 직경을 가지며, 350 - 400 °C에서는 약 3.0 - 3.5 μm의 평균 직경의 값으로 측정되었다. Rs(면 저항)는 결정립의 평균 직경에 반비례하였으며 Al 증착 온도 조건에 따라 약간의 편차를 가진다. 그림 5는 가장 좋은 조건에서의 Al 증착 온도에 따른 Rs값을 측정한 결과이다. 그림 5에서 온도가 높을수록 Rs값이 줄어들어 그 결과

EM에 대한 내구성이 향상된다는 것을 추정할 수 있다. 그러나 증착 온도가 350 °C 이상에서는 표면상태가 극히 나빠져서 Rs 값은 역으로 올라가게 되며 더 이상 EM에 대한 내구성이 향상되지 않았다. 이러한 결과는 입자가 커지면서 입자의 배치가 균일하지 않게 되므로 발생하는 것으로 추정된다.

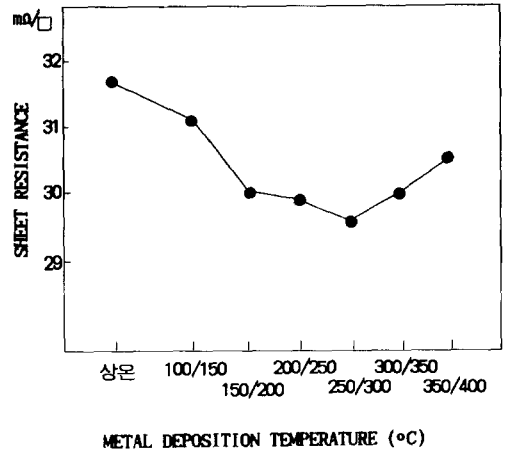


그림 5. 1%Si-Al 면 저항의 증착온도 의존성  
Fig. 5. Deposition temperature dependence of 1%Si-Al sheet resistance.

그림 6은 Al 증착 온도에 따른 표면 상태를 α-step을 이용하여 측정된 것이다. 그림 6(a) - (d)는 각각 200 °C, 300 °C, 350 °C, 400 °C에서 금속을 증착한 경우이며, (e)는 350 °C에서 증착한 시료에 Ar<sup>+</sup> 이온을 주입한 후 측정된 결과로서 이중결정립 구조를 갖는 시료이다. 그림에서 X축은 측정된 거리이다. 온도가 높아짐에 따라서 표면상태가 거칠어지고 있음을 알 수 있다. 그러나 (e)의 이중 결정립 구조에서는 길이에 관계없이 평탄한 표면으로 나타나 있다. 온도에 따른 금속의 표면 상태 변화는 그림 5에서의 Al 배선의 Rs값이 350 °C 이상에서 나빠지는 이유를 알 수 있게 해준다. 또한 Al 배선의 표면 상태는 SM과도 밀접한 관계가 있다. 거칠은 Al 표면은 그위에 형성된 보호막의 내부 압축 응력이 강하여 Al 내부의 응력을 심화시키며, 표면이 거칠어서 topology부위의 step coverage가 나빠지므로 SM에 악 영향을 미치게 된다.

이상의 결과에서 금속 증착 온도는 migration과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 즉 금속 증착 온

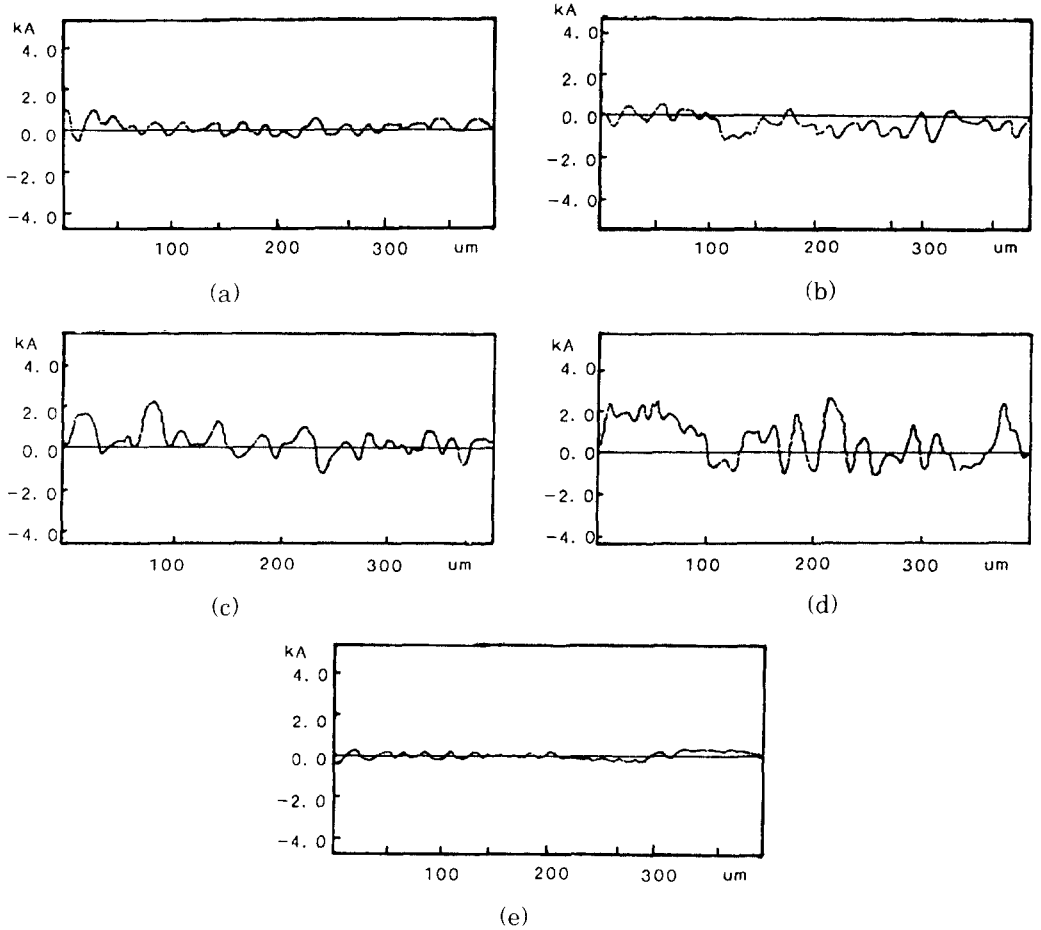


그림 6.  $\alpha$ -step을 이용한 금속 표면상태 측정결과.

증착온도:

(a) 200℃, (b) 300℃, (c) 350℃,

(d) 400℃, (e) 이중 결정립 구조

Fig. 6. Experimental results of metal surface-condition by  $\alpha$ -step. deposition temperature:(a) 200℃, (b) 300℃, (c) 350℃, (d) 400℃, (e) dual-sized grain structure.

도가 증가하면 결정립의 크기가 증가하여 저온 확산 통로수가 감소되면서 비저항이 줄어들어 원자의 이동이 감소하게 된다. 따라서 Al 배선의 Migration에 대한 내구성이 증가하게 된다. 그러나 그림 5와 그림 6에서 알 수 있듯이 증착 온도가 높아지면 금속의 표면 상태가 극히 나빠져 상하 막질사이의 응력이 급격히 증가되면서 SM이 일어나 전체적인 Al의 수명에 악영향을 미친다. 이것을 Ar+ 이온주입에 의해 Al의 표면을 고르게 해 주므로써 상하 막질간의 응력을 낮추어 전체적인 Al 배선의 수명을 향상시킬 수 있다.

Al 증착 온도에 따른 MTF를 EM과 SM으로 구분하여 그림 7에 보였다. 이 결과는 실험에 의해 얻어진 불량률 분석하여 그 요인(EM 과 SM)별로 구분한 후 불량시간(수명)을 산출하여 구하였다. 증착 온도가 높을수록 입자 크기가 커져서 EM에 대한 내구성은 강화되나, SM에 대한 내구성은 저하된다. 이것은 결정립의 크기가 커지면 Rs가 감소하여 전기 전도도는 증가되나 내부 응력이 함께 증가하므로써 나타나는 결과이다. 본 연구에서는 이와 같은 SM에 대한 내구성의 저하를 이중 결정립 구조를 이용하여 해결

하였다.

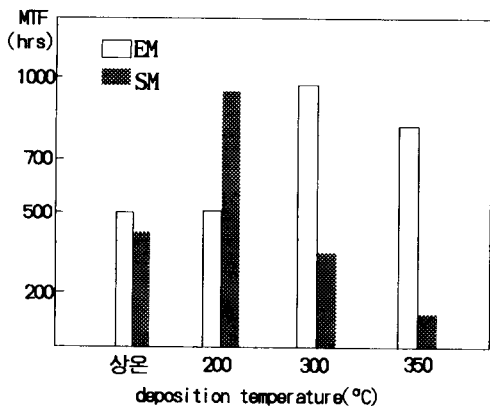


그림 7. 증착 온도에 따른 EM 및 SM의 수명 비교  
Fig. 7. Lifetime comparison of EM and SM due to deposition temperature

3. 이중 결정립의 구조 분석

EM에 대한 내구성을 증가시키기 위해 증착 온도를 높이면 그림 6과 같이 표면 상태가 거칠어져서 그림 7과 같이 SM에 대한 내구성이 상대적으로 감소한다. 이를 보완하기 위해 금속 표면위에 산화막을 증착시키고 Ar+을 주입시킨 후 산화막을 제거하면 그림 8과 같은 큰 결정립의 거칠은 구조가 그림 9와 같이 작은 결정립의 평탄한 표면을 갖게된다. 즉 그림

6(c)와 같이 큰 결정립의 거칠은 표면이 이온 주입에 의해 그림 6의 (e)와 같이 평탄화되면서 금속선의 표면은 그림 9와 같이 작은 결정립으로 변화된다. 결과적으로 가속 에너지 30 KeV의 이온 주입은 극히 표면의 결정립에 대해서만 반응되므로써 하부 금속층의 대부분은 변화되지 않은 상태로 남아있어 이중 결정립의 구조를 가지게 된다. 이렇게 하여 형성된 이중 결정립은 그 결합점에 불연속점이 존재하지 않고 단일층과 같은 이중 결정립 구조를 갖기 때문에 Al 배선은 전체적으로 상당히 안정된 양질의 막이 된다. 즉 큰 결정립의 하부층은 Rs의 값을 감소시켜 EM에 대한 내구성을 증가시키고, 작은 결정립의 상부 표면층은 표면이 평탄화되어 응력을 완화시킨다. 따라서 전체적인 응력의 균형을 이루게 하여 SM에 대한 내구성을 향상시키므로써 전체적으로 migration에 대한 내구성이 그림 4와 같이 향상되었다.

IV. 결론

1% Si-Al 재질의 금속선에서 single charged Ar ion(Ar+)을 이용하여 금속 표면에 이온 주입하여 형성된 이중 결정립 구조를 EM과 SM에 대한 신뢰성 관점에서 중점적으로 검토해 보았다. 이중 결정립은 저온 확산 통로수를 감소시키면서 상하 막질간의 응력을 억제시켜 주며, 그 결합점에서 불연속점이 발생되지 않아 Migration에 대한 내구성을 증가시켰다. 결과적으로 전기 전도도와 내습성에 있어서 가장 양호한 특성을 가지고 있으면서도 Migration 특성이

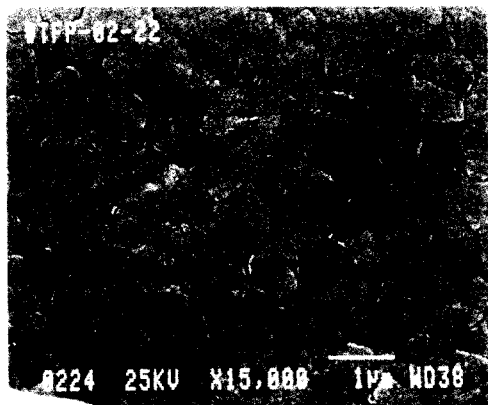


그림 8. 350°C에서 증착된 금속표면의 SEM 사진  
Fig. 8. SEM micrograph of metal surface deposited at 350°C.

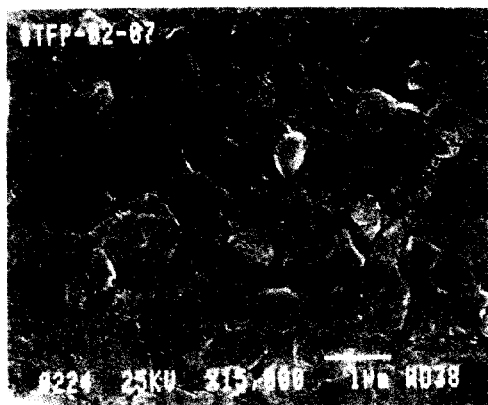


그림 9. 그림 8의 시료에 Ar+이온주입 후의 금속 표면 SEM 사진  
Fig. 9. after Ar+ ion implanted the sample in Fig.8, SEM micrograph of metal surface.

좋지 않아서 고 집적화, 고 출력화에 부적합하다고 생각되었던 1% Si-Al 재질의 금속선이 이중 결정립 구조의 공정을 사용하므로써 금속선의 면저항 값을 줄이고, 표면에 양호한 막질이 형성되면서 EM과 SM의 내구성이 동시에 향상되어 고 집적, 고 내습성 및 고 출력용 IC 제작시 적합한 재질임을 밝혔다.

參考 文獻

- [ 1 ] J.T.Yue, W.P.Funsten and R.V.Taylor, "Stress Induced Voids in Aluminum Interconnects during IC Processing." *Proc. Int. Rel. Phys. Symp.*, vol. 23, pp. 126 (1985)
- [ 2 ] J.Partridge and G.Littlefield, "Aluminum Electromigration Parameters." *Proc. Int. Rel. Phys. Symp.*, vol. 23, pp. 119 (1985)
- [ 3 ] S.Vaidya, D.B.Fraser and A.K.Sinha, "Electromigration Resistance of Fine-line Al for VLSI Application." *Proc. Int. Rel. Phys. Symp.*, vol. 18, pp. 165 (1980)
- [ 4 ] J.Klema, R.Pyle and E.Domangue, "Reliability Implications of Nitrogen Contamination during Deposition of Sputtered Aluminum/Silicon meta Films." *Proc. Int. Rel. Phys. Symp.*, vol. 22, pp.1 (1984)
- [ 5 ] D.K.Sadana, J.M.Towner, M.H.Norcott and R.C.Ellwanger, "Some TEM Observations on Electro-migrated Al and Al Alloy Interconnects." *Proc. Int. Rel. Phys. Symp.*, vol. 24, pp. 38 (1986)
- [ 6 ] P.P.Merchant, Hewlett Packard Journal, August 1982, pp. 28
- [ 7 ] J.M.Towner and E.P.Van de Ven, "Aluminum Electromigration under Pulsed D.C. Conditions." *Proc. Int. Rel. Phys. Symp.*, vol. 21, pp. 36 (1983)
- [ 8 ] W.Baerg and K.Wu, "Using Metal Grain Size Distributions to Predict Electromigration Performance". *Solid State Technology*, vol.34, No.3, pp.35 (1991)

著 者 紹 介



金 榮 出 (正會員)

1962年 1月 2日生. 1987年 2月 부산대학교 전자공학과 졸업 (학사) 1987年 1月~현재 삼성전자 반도체 근무 1993年 2月 서울시립대학교 대학원 전자공학과 졸업 (석사) 주관심 분야는 반도체 재

료, 신호처리 및 집적회로등임.



金 鐵 柱 (正會員)

1947年 2月 3日生. 1973年 한양대학교 1981年 3月 일본 Tokai대학 대학원 (석사) 1984年 3月 동대학원 박사과정 (박사) 1984年 3月~현재 서울시립대학교 전자공학과 조교수, 부교수 1989年~1990

年 일본 Sophia대학 이공학부 객원교수 주관심 분야는 반도체 재료 및 소자, SOI, TFT, Microstructure, 3차원 집적회로 개발등임.