

<연구논문>

## 극소전자 디바이스를 위한 Al-1%Si 박막배선에서의 Electromigration 특성

박영식 · 김진영

광운대학교 전자재료공학과  
(1995년 9월 1일 접수)

### Electromigration Characteristics in Al-1%Si Thin Film Interconnections for Microelectronic Devices

Y. S. Park and J. Y. Kim

Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University  
(Received September 1, 1995)

**요 약** - 전자소자의 축소화에 따라 박막배선에서의 electromigration은 점차 극소전자 디바이스의 주요 결함 원인으로 부각되고 있다. 본 실험에서는 현재 박막 배선 재료로 가장 널리 사용되고 있는 Al-1%Si 금속박막배선의 electromigration에 대한 온도 및 배선길이의 의존성에 관하여 연구하였다. PSG(8000 Å)/SiO<sub>2</sub>(1000 Å)/Al-1%Si(7000 Å)/SiO<sub>2</sub>(5000 Å)/p-Si(100)의 보호막처리된 시편과 Al-1%Si(7000 Å)/SiO<sub>2</sub>(5000 Å)/p-Si(100)의 보호막처리되지 않은 시편 등을 standard photolithography 공정을 이용하여 각각 제작하였다. 선폭 3 μm, 길이 100, 400, 800, 1600 μm 등의 Al-1%Si 박막배선구조를 사용하였다. 가속화실험을 위해 인가된 d.c. 전류밀도는  $4.5 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>이었고 실온에서 100°C까지의 분위기 온도에서 electromigration test를 진행하였다. 박막배선의 길이에 따른 MTF(Mean-Time-to-Failure)는 임계길이 이상에서 포화되는 경향을 보이며 이는 보호막층의 유무에 관계없이 나타난다. 선폭 3 μm인 Al-1%Si 박막배선에서 임계길이는, 보호막처리된 시편은 800 μm, 보호막처리되지 않은 시편은 400 μm 배선길이에서 나타난다. 이러한 포화의 경향은 낮은 온도에서 더욱 명확해지는 특성을 보인다. 각 시편에서 electromigration에 대한 활성화에너지도 MTF의 특성과 유사하게 임계길이 이상에서 포화되는 특성을 보인다.

**Abstracts** - With continuous miniaturizing of dimensions, an electromigration in thin film interconnections has become a critical failure mechanism in microelectronic devices. In this study, temperature and interconnection length dependences for an electromigration in widely used Al-1%Si thin film interconnections were investigated. Passivated PSG(8000 Å)/SiO<sub>2</sub>(1000 Å)/Al-1%Si(7000 Å)/SiO<sub>2</sub>(5000 Å)/p-Si(100) and nonpassivated Al-1%Si(7000 Å)/SiO<sub>2</sub>(5000 Å)/p-Si(100) specimens were fabricated by using a standard photolithography process. Al-1%Si thin film interconnection structures with a line width of 3 μm, and a line lengths of 100, 400, 800, 1600 μm were used. The direct current density stressed was  $4.5 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>, and temperatures from a room temperature to 100°C were used for an accelerated electromigration test condition. The interconnection length dependence on MTF(Mean-Time-to-Failure,  $t_{50}$ ) shows a saturation tendency above the critical length, which is generally appeared in both passivated- and nonpassivated Al-1%Si thin film interconnections. With the line width of 3 μm, the critical length of passivated Al-1%Si interconnections were observed at 800 μm, and that of nonpassivated interconnections were observed at 400 μm. The saturation tendency seems to be clear at low temperature. Similar saturation characteristics above the critical line lengths were also observed in the activation energy for an electromigration.

## 1. 서 론

반도체 소자의 고속화, 고집적화의 경향은 박막배선의 선폭을 submicron에 이르게 하고 있으며, 이에 따라 박막배선에서의 고전류밀도로 인한 electromigration은 극미세 전자소자에서 중요한 결함의 원인으로 부각되고 있다.

박막배선에서의 electromigration은 높은 전류밀도가 인가될 때 캐리어 전자와 모원자간의 운동량교환으로 인한 물질이동 현상을 말한다. 약 100여년전 액체금속 합금(liquid metal alloys well)에서 electromigration 현상이 관찰 되었으며[1], 1961년에 H. B. Huntington 등에 의해 본격적인 연구가 진행되어 박막배선에서 결함발생의 주된 원인으로 해석되었다[2]. 금속박막에서의 electromigration은 1970년대 후반, Blech와 Sello가 Al stripe에서 electromigration에 의한 crack의 형성을 확인하면서 시작되었다[3]. 1970년에 Agarwala 등은 전산모사를 통하여 이론적으로 Al 박막배선의 길이와 폭에 대한 electromigration에 의한 결함시간 의존성을 연구하였다[4]. 그들의 연구 결과는 박막배선의 길이가 증가함에 따라, 초기에는 수명시간이 감소하고 그 후 더 긴 길이에서는 포화된다는 것과 결함발생시간(Time-to-Failure, TTF)의 lognormal 분포의 분산도 비슷한 경향을 나타낸다고 발표하였다. 또한 수명시간은 박막배선 폭의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 보고되었다. 대부분의 electromigration 실험은 Al 박막배선에서 실행되어 왔고, 이후에 연구는 신뢰도 개선의 목적에 따라 Al 합금박막배선으로 전환되었다[5~7]. 절연보호막은 박막배선에서 외부 부식으로부터의 보호막 역할과 surface migration에 의한 물질이동 억제효과 등 electromigration에 대한 저항력을 향상시키는 것으로서 보고되었다 [8, 9].

본 연구에서는 길이가 다른 Al-1%Si 박막배선을 제작하여 electromigration에 대한 박막배선 길이의 의존성에 대하여 알아보았다. PSG/SiO<sub>2</sub> 보호막처리된 Al-1%Si 박막배선과 보호막처리되지 않은 Al-1%Si 박막배선에서의 길이 의존성을 각각 분석하였으며, electromigration에 대한 활성화에너지에 대하여 알아보았다. 각 박막배선에 4.5×10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup>의 고정된 전류밀도를 인가하여 결함발생시간(Time-to-Failure)을 측정, 평균수명시간(Mean-Time-to-Failure, t<sub>50</sub>)을 계산하였고, 실온(24℃)과 100, 60와 100℃의 분위기 온도를 조성, Black의 방정식

을 이용하여 활성화에너지를 구하였다[10].

## 2. 실험방법

Al-1%Si 박막배선의 길이 의존성과 활성화에너지 등을 관찰하기 위해 Boron이 도핑된 p형 Si(100) 웨이퍼를 기판으로 사용하여 열산화 방법으로 평균두께가 5000±20Å인 산화막 성장시키고 그 위에 MRC 920M D.C. 마그네트론 스퍼터를 사용하여 7000Å의 Al-1%Si을 증착, 사진 식각공정을 이용하여 패턴을 형성하였다. 그리고 PSG(8000Å)/SiO<sub>2</sub>(1000Å)의 보호막처리를 하여 보호막처리되지 않은 시편과 비교, 분석하였다. 시편의 제작과정을 그림 1에 나타내었다.

테스트 패턴은 3 μm의 선폭에 100, 400, 800, 1600 μm의 4가지 길이를 갖는 직선형으로 제작하였다. Keithley 228 전압/전류원으로 4.5×10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup>의 고정된 전류밀도를 인가하여 결함발생시간을 측정하고, 평균수명시간을 계산하였다. Heating mentle을 이용하여, 보호막처리된 시편은 실온과 100℃, 보호막처리되지 않은 시편은 60℃와 100℃의 분위기 온도를 조성하여 주었고, 열전대를 이용하여 정확한 온도를 유지하도록 하였다. 그리고 각 온도에서 electromigration 실험을 진행하여 활성화에너지를 Black의 방정식,  $MTF = AJ^{-n} \exp\left(\frac{Q}{KT}\right)$ , 을 이용하여 구하였다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 2는 보호막처리된 Al-1%Si 박막배선에 4.5×10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup>의 전류밀도를 인가한 후 측정한 결함발생시간(Time-to-Failure, TTF)과 결함발생누적확률의 관계를 나타낸 그림이다. 실험결과에 사용된 시편은 각 길이당 평균 5개이며 가장 큰 값과 가장 작은 값을 갖는 데이터를 제외한 중앙 2~4개의 값을 취하였다. 결함발생시간(Time-to-Failure, TTF)은 d.c. 인가시 저항변화에 따른 전기적 개방(electrical open)까지의 시간으로 하였다.

실온에서 결함발생누적확률이 50%일 때 결함발생시간(Time-to-Failure, TTF)은 100 μm의 길이에서 215, 400 μm의 길이에서 185 min.으로 800, 1600 μm의 길이를 갖는 배선의 29, 34 min.에 비하여 높다(그림 2a). 즉 배선길이의 증가에 따라 평균수명시간의 감소를 알 수 있다. 한편 100℃ 분위기온도에서 각 박막배선의 평균

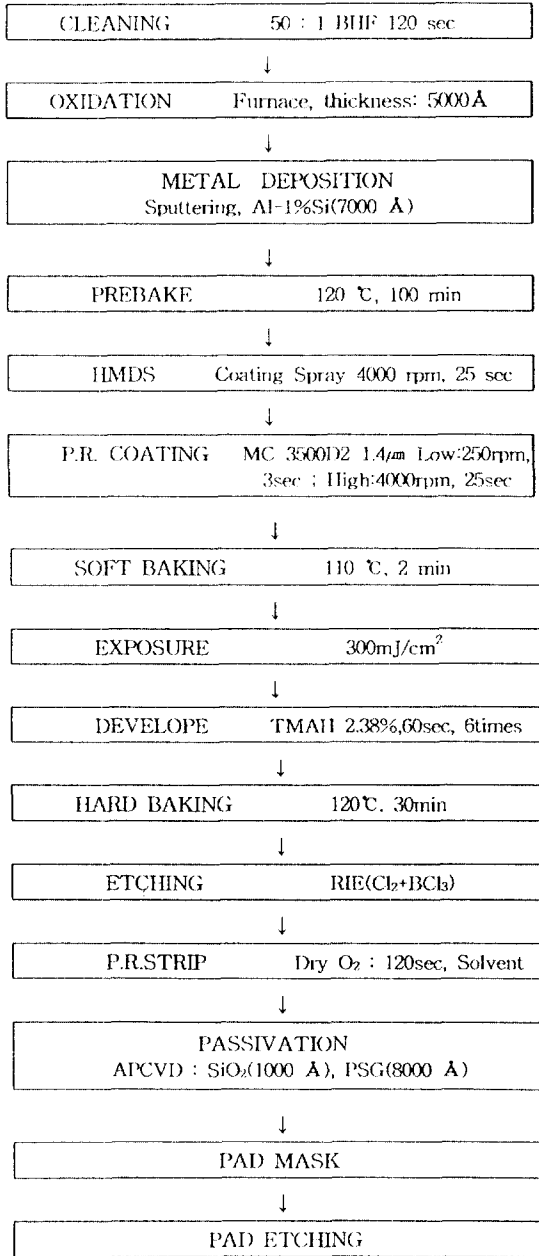


Fig. 1. A flow chart of the standard photolithography.

수명시간이 2~4 min.으로 나타나 전체적으로 실온에서의 평균수명시간보다 현저히 감소하는 것을 알 수 있다 (그림 2b). Black의 방정식,  $MTF = AJ^{-n} \exp(\frac{Q}{kT})$ , 에서 볼 수 있는 것처럼 평균수명시간(MTF,  $t_{50}$ )은 온도(T)가

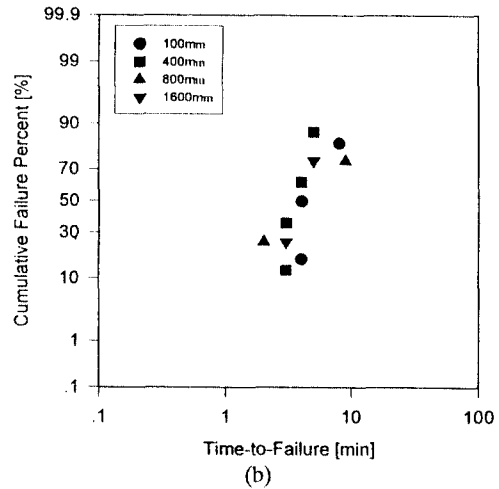
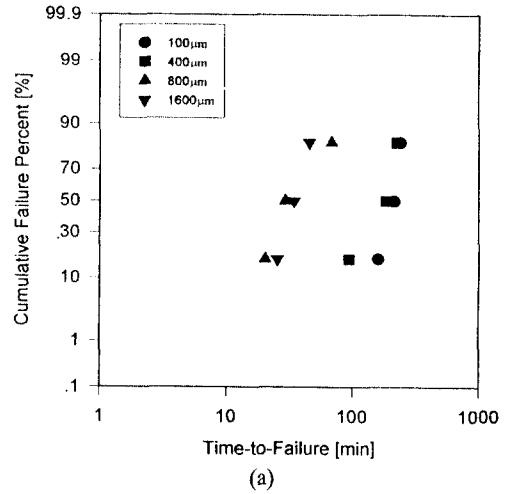


Fig. 2. Cumulative failure percent(%) vs. time-to-failure (TTF) of PSG/SiO<sub>2</sub> passivated Al-1%Si thin film interconnections. (a) at R.T. and (b) at 100°C.

증가하면 지수함수적으로 감소하게 된다. 즉 100°C의 온도는 실온에서와 비교하였을 때, 배선의 온도구배를 유발하기가 쉽다. 높은 온도에서는 원자의 이동도 (atomic mobility)를 증가시켜 온도구배에 따른 물질이동의 불균형에 의해 공극자(vacancy) 형성이 가속화되며 이는 결함발생의 원인이 된다.

그림 3은 보호막처리되지 않은 Al-1%Si 박막배선에  $4.5 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>의 전류밀도를 인가하여 60°C(그림 3a) 그리고 100°C(그림 3b)에서 측정된 결함발생시간(TTF, T<sub>i</sub>)와 결함발생누적확률의 관계를 보여준다. 60°C의 분위기온도에서 결함발생확률이 50%일 때 결함발생시간

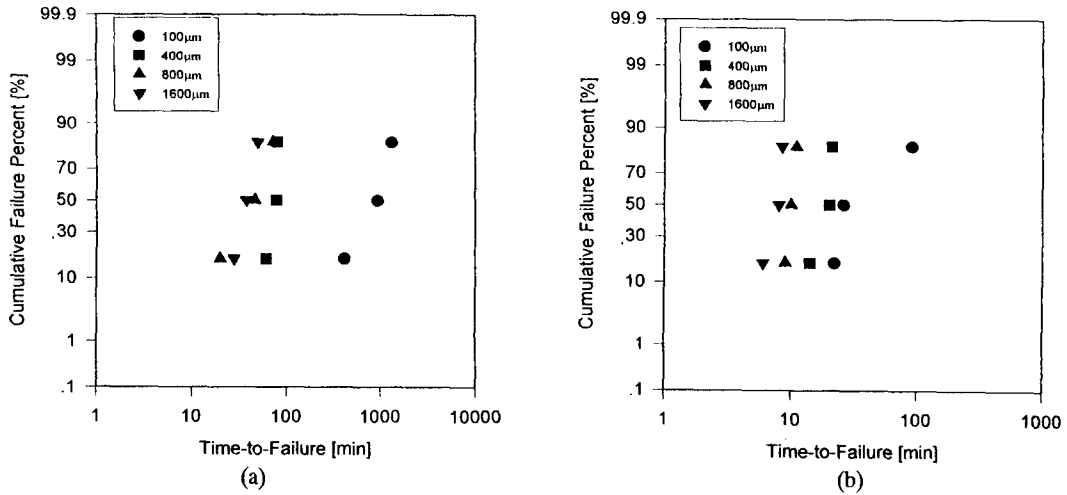


Fig. 3. Cumulative failure percent (%) vs. time-to-failure (TTF) of nonpassivated Al-1%Si thin film interconnections. (a) at 60°C and (b) at 100°C.

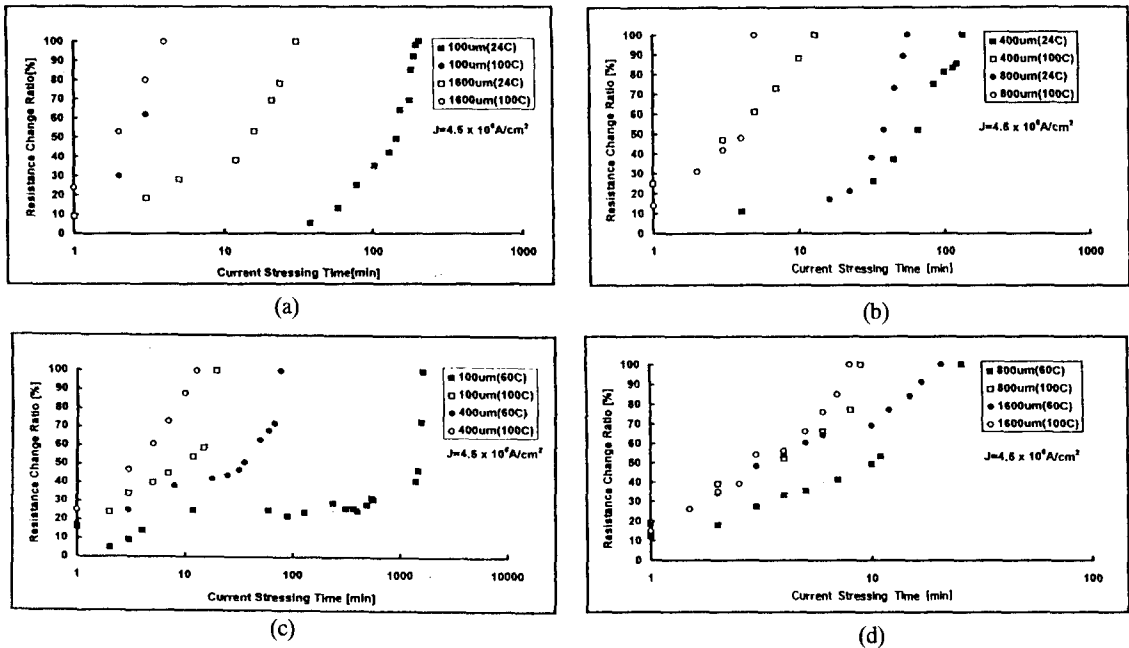
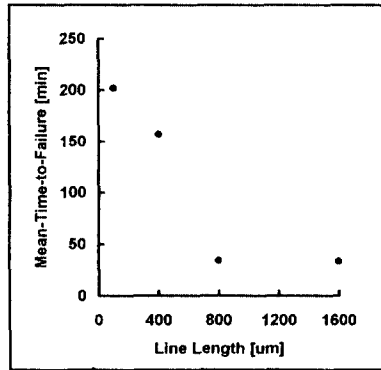


Fig. 4. Resistance change ratio (%) with the current stressing time of PSG/SiO<sub>2</sub> passivated [(a), (b)] and nonpassivated [(c), (d)] Al-1%Si thin film interconnections with line lengths of 100, 400, 800 and 1600 μm.

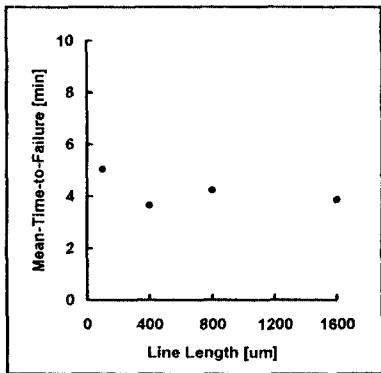
(TTF, T<sub>f</sub>)은 100, 400, 800, 1600 μm의 순서로 각각 936, 78, 47, 38 min.으로 나타났다. 100°C에서의 평균수명시간은 26, 20, 10, 8 min.으로 각각 측정되어 박막배선의 평균수명시간(MTF, t<sub>50</sub>)은 보호막층의 유무에 관계없이 배선길이가 증가할수록 감소하였고 또한 온도가 증가할

수록 감소하는 길이 및 온도 의존성을 보인다.

d.c. 전류인가 시간에 따른 박막배선에서의 저항변화비를 그림 4의 (a)~(d)에서 나타내었다. 저항변화비는 결함발생 직전에 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 모든 박막배선에서, 낮은 분위기 온도에서의 박막배



(a)



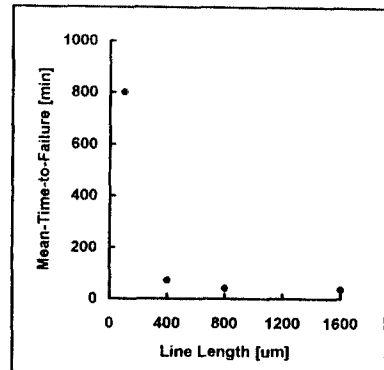
(b)

Fig. 5. Mean-time-to-failure (MTF) of Al-1%Si thin film interconnections with various line lengths of PSG/SiO<sub>2</sub> passivated Al-1%Si thin film interconnections measured at (a) R.T. and (b) 100°C.

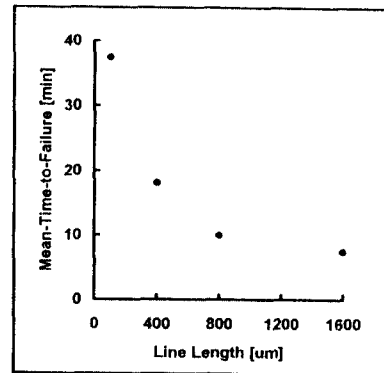
선이 높은 온도의 박막배선에서보다 결함발생시간 (TTF, T<sub>i</sub>)이 길게 나타나는 것을 알 수 있다.

그림 5와 6은 박막배선길이에 따른 평균수명시간 (MTF, T<sub>50</sub>)의 변화를 보여준다. 그림 5의 (a)와 (b)는 PSG/SiO<sub>2</sub> 보호막처리된 Al-1%Si 박막배선에서 실온(그림 5a) 및 100°C(그림 5b)에서 측정된 박막배선길이에 따른 평균수명시간의 변화를 나타낸다. 실온에서 배선 길이에 따른 평균수명시간은 100, 400, 800, 1600 μm 길이의 순서로 각각 201.69, 157.02, 34.04, 33.69 min.의 값을 나타내어 배선길이의 증가에 따라 감소하는 경향을 볼 수 있다. 100°C의 분위기 온도에서는 평균수명시간이 5.04, 3.66, 4.24, 3.87 min.으로 측정되었다.

그림 6의 (a)와 (b)는 보호막처리되지 않은 Al-1%Si 박막배선의 60°C(그림 6a) 및 100°C(그림 6b)에서 측정된 박막배선길이에 따른 평균수명시간의 변화를 나타낸



(a)

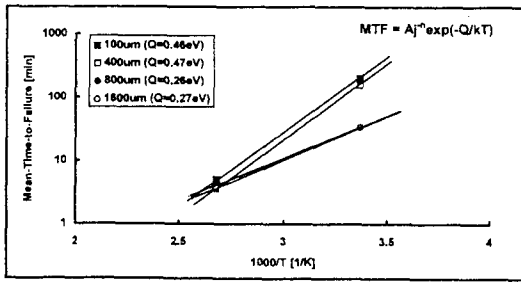


(b)

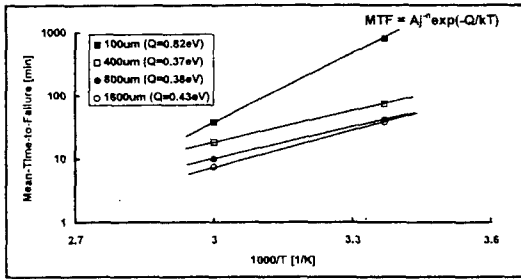
Fig. 6. Mean-time-to-failure (MTF) of Al-1%Si thin film interconnections with various line lengths of non-passivated Al-1%Si thin film interconnections measured at (a) 60°C and (b) 100°C.

것으로, 길이에 따른 평균수명시간이 60°C에서 799.30, 72.47, 40.94, 37.61 min., 100°C에서 37.34, 18.05, 9.97, 7.42 min.을 나타내어 보호막처리된 시편에서와 마찬가지로 길이의 증가에 따른 평균수명시간의 감소와 포화의 경향을 보인다. 포화현상이 나타나는 임계길이는 선 폭 3 μm인 Al-1%Si 박막배선에서 배선길이 400~800 μm에서 관찰되었으나 배선재료, 선폭, 길이 등의 요인에 대한 구체적 상관관계는 앞으로 연구가 진행되어야 할 것 같다.

임계길이 이상에서 평균수명시간의 포화는 박막배선의 평균수명시간이 결함의 평균값에 의해서가 아니라, 모든 결함중 가장 심한 것에 의해서 영향을 받기 때문으로 사료된다. 즉 임계길이 이상의 박막배선은 결함에 직접적인 영향을 미치는 심한 결함을 포함할 확률이 크고, 이것이 결함의 발생을 유발하기 때문에 배선길이에



(a)



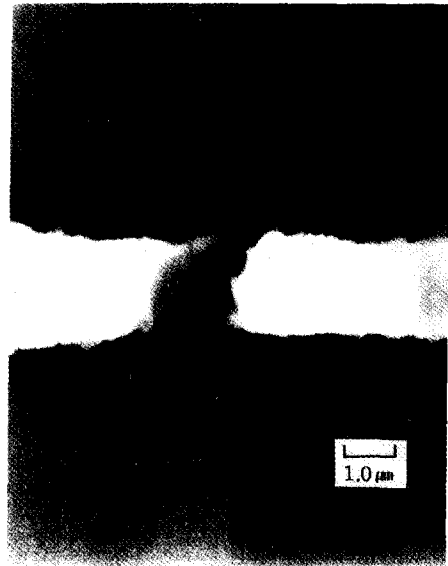
(b)

Fig. 7. Activation energy (Q) for an electromigration in (a) PSG/SiO<sub>2</sub> passivated and (b) nonpassivated Al-1%Si thin film interconnections.

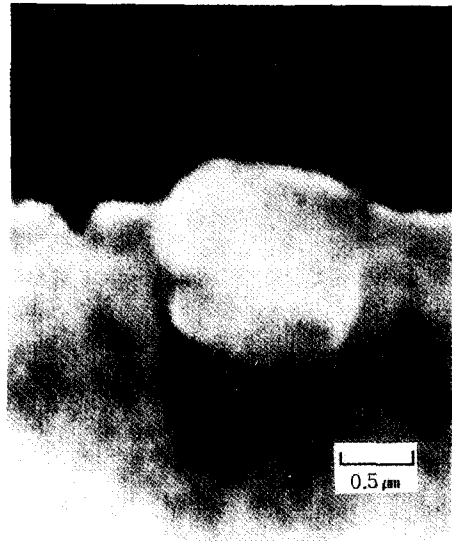
크게 영향을 받지 않고 비슷한 평균수명시간을 갖게 된다[4]. Agarwala와 공동 연구자들은 Al 도체막의 길이와 폭에 대한 electromigration에 의한 결함시간의 의존성을 연구하였다[4]. 이에 의하면 도체의 길이가 증가함에 따라, 초기에는 수명시간이 감소하고 그 후 더 긴 길이에서는 포화된다는 것으로 나타났다. 또한 TTF(Time-to-Failure)의 lognormal 분포의 분산도 비슷한 경향을 나타낸다는 것을 발표하였다. 더 나아가 평균수명시간은 도체폭의 증가에 따라 선형적으로 증가하는 것으로 관찰되었다. 이러한 길이와 폭의 의존성은 다음과 같은 실험적 관계식을 따른다고 알려져 있다.

$$t_{50} = Aw \exp(\alpha/l)$$

여기서 A는 상수이고, w는 박막배선의 폭, α는 폭에 의존하는 상수, l은 박막배선의 길이이다[4]. 일반적으로, 평균수명시간은 비슷한 전류밀도에서 보호막처리되지 않은 시편보다 보호막을 입힌 시편에서 더 길다는 것이 보고되었다[9, 11~13]. 이것은 보호막이 온도를 균일하게 하여 온도의 구배를 줄여주고, 보호막층이 질량의 축적(build-up)을 유도, 원자전속(atomic flux)을 줄여 elec-



(a)



(b)

Fig. 8. SEM micrographs of electromigration induced failures observed in an Al-1%Si thin film interconnection after d.c. stressing (a) voids and (b) Hillocks.

tromigration에 대한 저항성을 증가시키기 때문인 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 보호막처리된 시편의 평균수명시간이 보호막처리되지 않은 시편보다 짧게 측정되었다. 이것은 본 연구에서 사용된 PSG/SiO<sub>2</sub> 보호막처리된 Al-1%Si 박막배선과 보호막처리되지 않은 박막배

선의 제작시기가 1년 이상 차이가 나는데 기인하는 것으로 사료된다. 이는 실온상호확산, 미세구조 변화, 그리고 제작공정조건 등의 요인들이 박막배선의 평균수명에 영향을 주었을 가능성이 있기 때문이다. P. B. Ghate 등은 증착시 조건, 미세구조 등 요인이 평균수명 및 electromigration에 대한 활성화에너지에 영향을 준다는 것을 보고한 바 있다[14].

그림 7은 Black의 방정식을 이용하여 구한 활성화에너지를 나타내었다. 보호막처리된 시편의 경우 100, 400  $\mu\text{m}$ 의 배선이 0.46과 0.47 eV의 값이 측정된 반면 800, 1600  $\mu\text{m}$ 의 배선은 0.26, 0.27 eV의 값이 측정되어 활성화에너지의 포화를 확인할 수 있다(그림 7a). 보호막처리되지 않은 시편은 100  $\mu\text{m}$ 의 배선이 0.82 eV가 측정되어 0.37, 0.38, 0.43 eV의 값을 나타내는 나머지 길이의 배선과 명확한 차이를 나타낸다(그림 7b). 이러한 경향은 평균수명시간(MTF,  $t_{50}$ )의 포화와 유사한 특성을 나타낸다(그림 5, 6).

일반적인 경우, 보호막처리된 박막배선의 활성화에너지 값이 보호막처리되지 않은 박막배선의 활성화에너지 값보다 크다[9]. 그러나 활성화에너지의 값이 배선물질의 종류 뿐만 아니라, 증착시 여러가지 요인에 의해 영향을 받을 수 있다는 사실과 미세구조적 축적 효과의 불균일성, 평균결정입계의 확산, 온도구배, 기판, 보호코팅 등 여러 요인과 관련되어 있는 것을 고려하면, 본 연구에서 보호막처리되지 않은 박막배선의 활성화에너지 값이 보호막처리된 박막배선의 경우보다 크게 측정된 것은 앞서 논의된 바와 같이 제작과정이 서로 다른 데서 기인한 것으로 사료된다. 절연보호막 효과에 대한 중점적 연구는 이미 발표된 바 있다[9].

그림 8은 주사전자현미경 사진으로서 d.c. 인가 후 electromigration에 의해 발생된 void와 hillock을 나타낸다. 그림 8의 (a)는 음전류를 인가한 쪽으로 발생한 void의 모습을 보여주며 그림 8(b)는 양전류를 인가한 쪽으로 Al의 축적에 의한 hillock의 생성을 보여준다.

#### 4. 결 론

Al-1%Si 박막배선은 보호막층의 유무에 관계없이 배

선길이에 대하여 MTF 및 활성화에너지의 길이 의존성을 보이며, 또한 일정한 임계길이 이상에서 포화의 특성을 나타낸다. Electromigration에 대한 배선길이 의존성은 높은 온도에서 보다 낮은 온도에서 더욱 두드러지는 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

본 연구는 1994년도 한국과학재단 핵심전문 연구과제(941-0800-007-2)에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Milton Ohring, *The Materials Science of Thin Films* (Academic Press, Inc., 1991), Vol. 9, p. 379.
2. H. B. Huntington and A. R. Grone, *J. Phys. Chem. Solids* **20**, 76 (1961).
3. I. A. Blech and H. Sello, in *Physics of Failure in Electronics 5* (USAF-RADC Series, 1966), p. 496.
4. B. N. Agarwala, M. J. Attardo and A. P. Ingraham, *J. Appl. Phys.* **41**, 3954 (1970)
5. I. Ames, F. M. d'Heurle and R. Hosrtman, *IBM J. Res. Dev.* **14**, 461 (1970)
6. M. C. Shine and F. M. d'Heurle, *IBM J. Res. Dev.* **15**, 378 (1971)
7. A. G. Dirks, R. A. Augur and A. E. M. De Veirman, *Thin Solid Films* **246**, 164 (1994)
8. M. Hassel Shearer and F. Quadri, *IEEE Reliability Physics Symposium*, **18**, 95 (1980)
9. 양인철, 김진영, *한국진공학회지* **4**(2), 217 (1995).
10. J. R. Black, *IEEE Trans. Electron. Devices* **ED-16**, 338 (1969)
11. S. M. Spitzer and S. Schwartz, *IEEE Trans. on Electron. Devices* **ED-16**, 348 (1969).
12. N. G. Ainslie, F. M. d'Heurle and O. C. Wells, *Appl. Phys. Letters* **20**, 172 (1972)
13. I. A. Blech and E. Kinsborn, *Thin Solid Films* **25**, 327 (1971).
14. P. B. Ghate, *IEEE Reliability Physics Symposium*, March **30**, 292 (1982)