

<연구논문>

## Al-1%Si 박막금속배선에서 전류 크라우딩 효과 및 Electromigration

조형원 · 김대일 · 김진영

광운대학교 전자재료공학과  
(1994년 1월 31일 접수)

### Current Crowding Effects and Electromigration in Al-1%Si Thin Film Metallizations

H. W. Cho, D. I. Kim and J. Y. Kim

Department of Electronic Materials Engineering Kwangwoon University  
(Received January 31, 1994)

**요 약** - 본 논문에서는 Al-1%Si 박막금속배선에서 국부적 전류 크라우딩 효과 및 박막금속배선의 길이에 따른 수명의 변화, 그리고 이중금속배선에서의 전계효과를 연구하였다. 전류 크라우딩 효과에 의한 박막금속배선의 수명감소를 관찰하기 위해 넓은 도선과 좁은 도선이 반복적으로 연결되어 있는 구조의 금속배선과 틱니 형태의 금속배선을 제작하였다. 길이에 따른 박막금속배선의 수명변화를 연구하기 위해 100, 400, 800, 1200, 그리고 1600  $\mu\text{m}$ 의 길이를 갖는 3  $\mu\text{m}$  선폭의 박막금속배선을 각각 제작하였다. Al-1%Si 박막금속배선에 인가된 전류밀도는  $3.5 \sim 4.5 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 이었다. 이중금속배선에서 전계에 의한 수명의 변화를 살펴보기 위해 두 금속배선 사이에 0,  $\pm 30$ ,  $\pm 60 \text{ V}$ 의 전계를 인가하고, 상층 금속배선에  $1.75 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 의 전류밀도를 인가하여 실험하였다. 실험 후 각각의 조건들에 대한 평균수명, 표준편차, 그리고 90% 신뢰구간을 조사하였으며, 발생한 결함현상에 대한 분석은 광학현미경과 주사전자현미경으로 관찰하였다. 주요 결론으로는 박막금속배선에서 전류 크라우딩 효과는 수명의 감소를 초래하며, 박막금속배선의 길이가 증가함에 따라 수명은 급격하게 감소하다가 포화된다. 중첩된 이중금속배선에서는 전계효과에 의한 금속배선의 수명감소현상이 가속된다.

**Abstract** - In this study, the lifetime variations in Al-1%Si thin film metallizations due to the local current crowding effects, with various metallizations line lengths, and the electric field effects in double-layer metallizations were investigated. To investigate the current crowding effects on the lifetime of thin film metallizations, the wide and narrow links and the saw type metallization structures were fabricated. To study the line length dependence of the lifetime, 100, 400, 800, 1200, and 1600  $\mu\text{m}$  thin film metallizations with 3  $\mu\text{m}$  line width were also fabricated. The current densities stressed in Al-1%Si thin film metallizations were in the range of  $3.5 \sim 4.5 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ . To study the electric field effects on the lifetime in double-layer metallizations, the electric fields of 0,  $\pm 30$ ,  $\pm 60 \text{ V}$ , were applied between the two metal lines, and the upper thin film metallization is stressed with  $1.75 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$  current density. The mean time-to failure(MTF), standard deviation ( $\sigma$ ), and 90% confidence limits were measured. Optical microscope and scanning electron microscope (SEM) were used to analyze the failures in thin film metallizations. The main results are as follows. The current crowding effects result in the decrease of the lifetime in thin film metallizations. Also the lifetime decreases rapidly with the increase of the until saturation. The electric field effects accelerate the decrease of the lifetime in the double-layer metallizations.

#### 1. 서 론

반도체 산업의 지속적인 발전으로, 현재 반도체 제

조기술은 초고집적 기술인 ULSI 시대에 이르고 있다. 이러한 초고집적 기술에서는 반도체 소자의 고집적화와 처리속도 증가를 위해 박막금속배선(Thin Film

Metallizations)의 선폭이  $0.5\ \mu\text{m}$  이하 범위로 줄어들고 있으며, 적층화를 위한 다층금속배선(Multilevel Metallizations)과 같이 다양한 구조를 갖는 박막금속배선이 이용되고 있다. 초고집적 반도체 기술 설계시 요구되는 박막금속배선의 조건에는 크게 공정의 적합성과 용이성, 전기적 요건, 그리고 신뢰성 등이 있는데, 특히 신뢰성에는 열적, 화학적 안정성, 내부식성, 내산화성, 그리고 Electromigration에 대한 저항성 등이 요구된다.

박막금속배선에서 발생하는 주된 결함에는 증착된 Al을 열처리 하거나, 증착시 높은 온도로 기판을 가열하게 되면 발생하는 Si-Al 상호반응, 알칼리 이온의 침투, 주로 플라스틱 패키지가 발생하는 부식현상, 그리고 박막금속배선에 고전류밀도가 인가될 때 캐리어 전자와 모원자간의 운동량 교환으로 인하여 물질이 이동하는 현상인 Electromigration[1] 등이 있다. 특히 Electromigration에 의한 결함의 발생은 Al 박막배선을 기본으로 하는 소자의 평균수명 및 신뢰성에 심각한 문제를 야기하며, 그 해결이 매우 시급한 실정이다.

Electromigration 현상은 1930년대, 금속에서의 물순물 제거, 물질의 도핑 등에 필요한 기술로서 관심의 대상이 되었었다. 그 후 반도체 제조 기술의 발전과 함께 미세회로내 박막전도체 결함 발생의 주된 원인으로 작용함에 따라 큰 관심의 대상이 되었다. 초기 Electromigration에 대한 연구는 주로 현상에 대한 기본적인 원리에 집중되었으며[2], 그 후 기본적인 현상과 신뢰도 판단의 기초가 되는 시편 매개변수에 대한 연구뿐만 아니라, 결정립 크기의 성장[3], 보호막 효과[4], 합금 물질의 이용[5], 그리고 내화금속 등을 이용하여[6] Electromigration에 대한 저항성을 향상시키기 위한 연구가 이루어지고 있다. 또한 박막금속배선의 선폭[7], 길이, SWEAT(Standard Wafer-level Electromigration Acceleration Test) 구조[8], 그리고 다층의 박막배선과[10] 같은 박막금속배선의 형태 변화에 따른 Electromigration의 수명 변화에 대한 연구가 현재 진행되고 있으며, 최근에는 실험 논문이 이어 Electromigration에 대한 통계적이고 이론적인 해석을 위한 연구가[11] 활발히 이루어지고 있다.

본 논문은 박막금속배선 형태 변화에 따른 전류 크라우딩 효과 및 금속배선의 길이 변화에 따른 수명 변화, 그리고 이층금속배선에서의 전계효과에 대하여

연구한 것이다.

## 2. 실험방법

본 연구를 위한 박막배선의 구조는 직류전류를 인가하여 Electromigration으로 인한 박막금속배선의 저항 증가를 관찰함으로써 결함의 분포를 규정하도록 설계하였다. 각각의 박막금속배선들은 전류를 인가하고 전압을 측정하기 위한 두 개의 단자와 테스트 라인으로 구성되어 있으며, 테스트 라인의 각 끝은 접촉 단자와 테스트 라인과의 경계면에서 발생하는 전류 크라우딩 효과를 감소시키기 위해 폭이 테스트 라인의 두 배인 넓은 도선에 연결되며, 이 도선에서 접촉단자까지의 길이는  $100\ \mu\text{m}$  이상이다. Electromigration에 미치는 전류 크라우딩 효과를 연구하기 위한 테스트 라인은 Electromigration에 기인한 박막금속배선 결함의 주된 원인이 되는 원자선속(Atomic Flux)의 발산을 인위적으로 유발하기 위해 설계된 구조로, Fig. 1의 (a)와 (b)에 보여주고 있다. Fig. 1(a)는 넓은 도선과

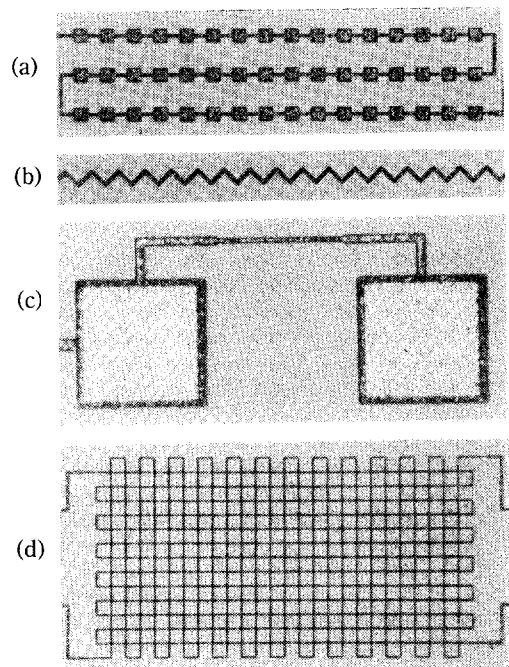


Fig. 1. Photographs of the test lines before electromigration test. (a) Wide & narrow links structure, (b) Saw type line, (c) Straight line, (d) Double-layer metallizations.

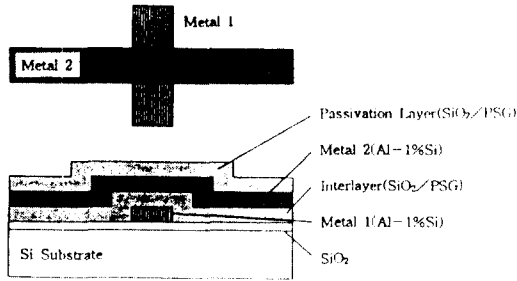
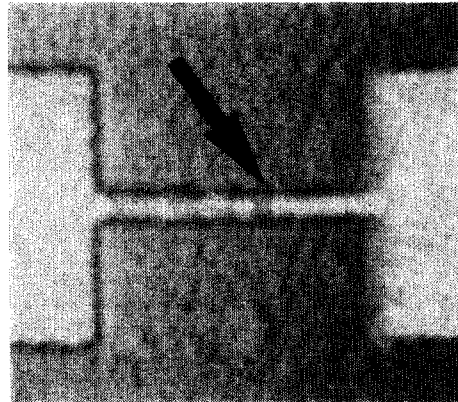


Fig. 2. Cross section of the test stripe.

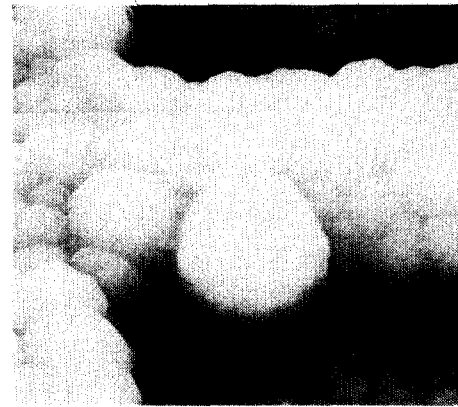
좁은 도선이 맞물려 있는 구조(Wide and Narrow Links Structure)로 두 부분의 경계면이 결함의 발생원 역할을 한다. 전류 크라우딩 효과의 정도를 살펴보기 위해 넓은 부분의 선폭은  $30\ \mu\text{m}$ 로 고정하고 좁은 부분의 선폭을 3과  $5\ \mu\text{m}$ 의 두 가지 형태로 하였다. Fig. 1 (b)는 톱니 형태(Saw Type Line)로 구부러진 부분에서의 결함발생이 예상되며, 역시 전류 크라우딩 효과를 관찰하기 위해 선폭을 각각 3과  $6\ \mu\text{m}$ 로 제작하였다. 박막금속배선의 길이 변화에 따른 수명 변화를 연구하기 위한 테스트 라인의 구조는 직선으로,  $3\ \mu\text{m}$ 의 선폭을 갖으며 길이가 각각 100, 400, 800, 1200 그리고  $1600\ \mu\text{m}$ 이다[Fig. 1(c)]. 이층금속배선에서의 전계효과를 관찰하기 위한 테스트 라인은 Meander 구조로 메탈 1과 메탈 2로 구성되어 있다. 각각의 금속배선은  $3\ \mu\text{m}$ 의 선폭을 갖으며, 메탈 1은  $12510\ \mu\text{m}$ 의 길이와  $7000\ \text{\AA}$ 의 두께 그리고 메탈 2는  $13290\ \mu\text{m}$ 의 길이와  $10000\ \text{\AA}$ 의 두께를 갖는다[Fig. 1(d)].

시편의 기판으로는 도핑 물질로 Boron이 첨가된 P-형의 Si(100) 웨이퍼를 사용하였으며, 먼저 열산화 방법으로 평균 두께가  $5000 \pm 20\ \text{\AA}$ 인 산화막을 성장시킨다. 다음에 MRC 920M D.C. 마그네트론 스퍼터를 사용하여  $7000\ \text{\AA}$ 의 Al-1%Si(메탈 1)을 증착한 후, 표준사진식각공정으로 패턴을 형성하였다. 패턴이 형성된 메탈 1 위에  $1000/8000\ \text{\AA}$ 의  $\text{SiO}_2/\text{PSG}$ 를 절연막으로 증착하였고, 그 위에  $10000\ \text{\AA}$ 의 Al-1%Si을 메탈 2로 증착한 다음 보호막으로  $1000/8000\ \text{\AA}$ 의  $\text{SiO}_2/\text{PSG}$ 를 증착하였다. 제작된 시편은 PLCC(Plastic Leaded Chip Carrier)로 패키징하였으며, 완성된 패키지는 Chip Table에 Mount 시켰다. 시편의 단면적이 Fig. 2에 보여진다.

본 실험에서는 박막금속배선에 가속화 실험조건으로 일정한 전류밀도를 인가해 주기 위해 전류원으로



(a)



(b)

Fig. 3. Failures in wide & narrow links structure after electromigration test. (a) Voids, (b) Hillocks.

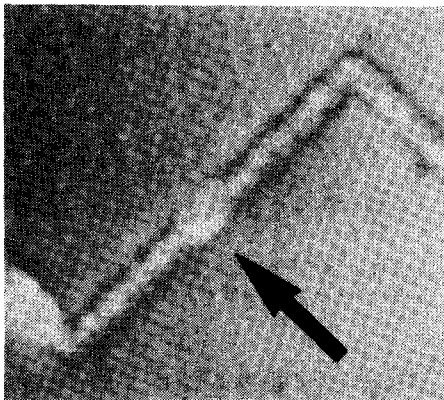
Keithley 228 전압/전류원을 사용하였고, 결함발생시간인 Time-to Failure,  $t_f$ 와 박막금속배선의 전압변화를 결정하기 위해 GPIB Interface를 사용하였다. 박막금속배선의 시간에 따른 저항 변화를 관찰하여 회로의 Open으로 인한 저항의 급격한 증가를 보이는 시간을 수명( $t_f$ )으로 측정하였다. 전류 크라우딩 효과를 관찰하기 위해 두 가지 형태의 박막금속배선에 인가된 전류밀도는  $3.5 \times 10^6\ \text{A/cm}^2$ 이었으며, 길이에 따른 Electromigration 수명의 변화를 연구하기 위해 여러 길이를 갖는 박막금속배선에  $4.5 \times 10^6\ \text{A/cm}^2$ 의 전류밀도를 인가하여 실험하였다. 또한 이층금속배선에서 두 배선간에 형성된 전계에 의한 박막금속배선의 수명변화를 연구하기 위해 메탈 1과 메탈 2 사이에 0,  $\pm 30$ ,  $\pm 60\ \text{V}$ 의 전계를 인가한 후, 메탈 2에  $1.75 \times 10^6\ \text{A/cm}^2$ 의 전류밀도를 인가하여 실험하였다. 이층금속

배선에서의 Electromigration 실험은 메탈 2에서만 이루어졌다. 실험 후에 발생한 결함은 광학현미경과 주사전자현미경 등의 분석기기를 이용하여 분석하였다.

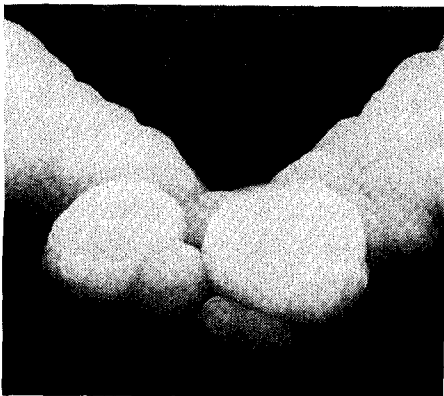
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. Electromigration에 대한 전류 크리우딩 효과

Fig. 3과 4는 Wide & Narrow Links Structure와 Saw Type Line에  $3.5 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>의 전류밀도를 각각 인가한 후, Electromigration에 의해 발생한 결함들이다. Wide & Narrow Links Structure에서는 박막 금속배선의 구조적 변화가 상대적으로 적은 5  $\mu$ m의 Narrow Line을 갖는 박막금속배선이 3  $\mu$ m의 Narrow Line의 경우보다 더 수명이 긴 것으로 나타났으며, Saw Type Line에서도 구조적 변화가 상대적으로 적



(a)



(b)

Fig. 4. Failures in saw type line after electromigration test. (a) Voids, (b) Hillocks.

은 6  $\mu$ m의 선폭을 갖는 박막금속배선에서의 수명이 긴 것으로 나타났다. Electromigration 현상은 원자 선속의 발산에 의한 물질이동현상이다. 본 연구의 테스트 라인에서는 Wide Line과 Narrow Line이 연결되는 경계면에서 물질이동경로의 변화와 테스트 라인 구조의 급격한 변화로 인한 선속 발산이 발생하게 된다. 원자선속이 Wide Line에서 Narrow Line으로 이동할 때는 Hillocks로 결함이 발생하게 되고, Narrow Line에서 Wide Line으로 이동할 때는 Voids에 의한 결함이 발생하게 된다. 반면 Saw Type Line에서는 테스트 라인이 구부러진 부분에서 물질이동경로의 변화와 라인 구조의 급격한 변화로 인한 선속 발산이 발생하게 되며 구부러진 부분의 안쪽과 바깥쪽에서 선속 발산 정도의 차 또한 발생하게 된다. 따라서 구부러진 부분을 경계면으로, 한쪽에서는 Voids에 의한 결함이 그리고 다른 한쪽에서는 Hillocks에 의한 결함이 발생하게 된다.

#### 3.2. 박막금속배선의 길이변화에 따른 Electromigration 수명

Fig. 5에 결함발생시간에 대한 박막금속배선의 길이 효과를 나타내고 있다. 길이가 400  $\mu$ m까지 증가함에 따라 수명이 급격히 감소하다가 800  $\mu$ m 이상에서는 박막금속배선의 길이에 대한 영향을 받지 않는 것으로

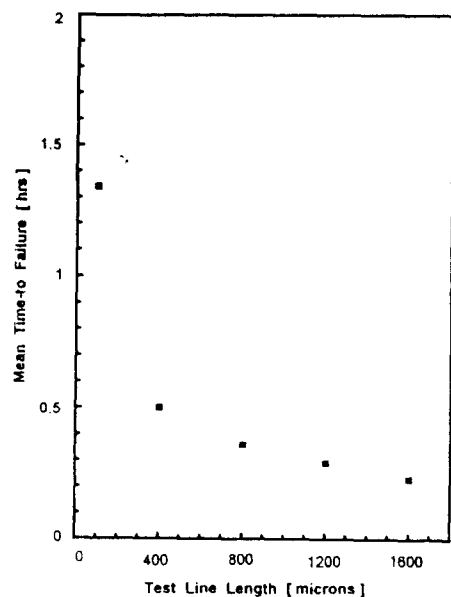
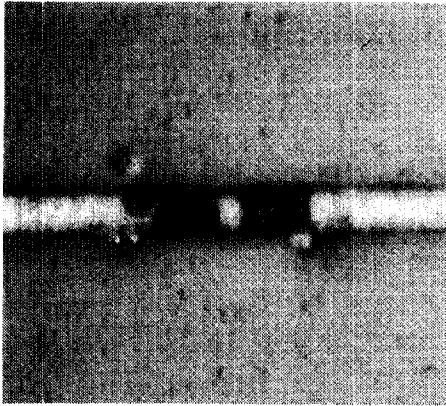
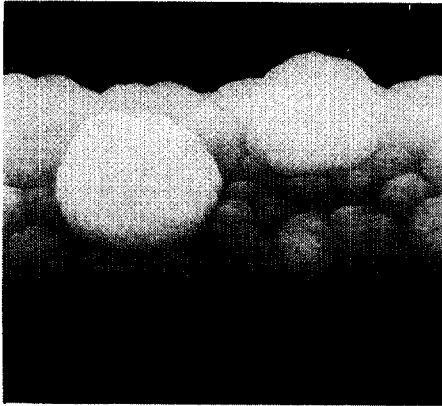


Fig. 5. Time-to-failure vs. test line length.



(a)



(b)

Fig. 6. Failures in straight line after electromigration test. (a) Voids, (b) Hillocks.

나타났다. 이러한 결함발생시간에 대한 박막금속배선의 길이 효과와 임계길이 이상에서의 박막금속화 수명의 포화는 다음에 의해 설명된다.

박막금속배선은 많은 수의 단위체적으로 구성되어 있으며, 이 단위 체적에는 선속의 발산을 유발하는 결함들이 포함되어 있다. 박막금속배선의 수명은 가장 큰 선속 발산에 의해 결정된다. 즉, 결함들의 평균 강도가 아닌 가장 심한 강도의 결함에 의해 결정되는 것이다. 만약 결함들의 밀도(단위 길이당 결함들의 수)가 일정하다면 박막금속배선의 길이가 증가함에 따라 총 결함들의 수 또한 함께 증가할 것이다. 길이가 긴 박막금속배선에서 강도가 큰 결함을 발견할 확률이 커지게 되며 상대적 수명의 감소가 예상된다. 또한 결함들의 강도 정도에는 한계치가 존재하며, 이러한 한계 강도의 결함은 임계길이( $l_c$ )를 넘었을 때 박막금

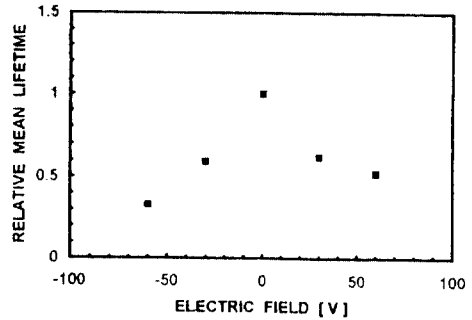


Fig. 7. Relative mean lifetime of thin film metallization with the magnitude and polarity of electric field.

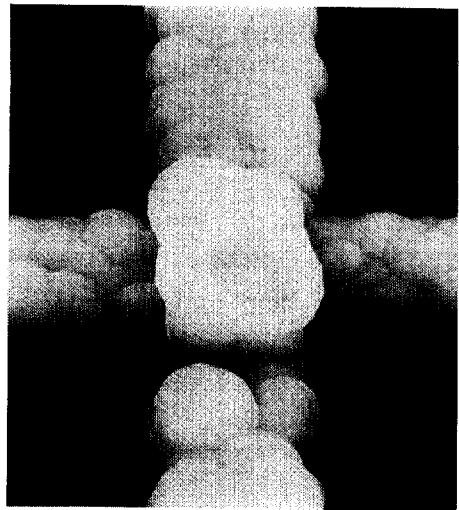


Fig. 8. Failures in the double-layer metallizations

속배선 내에 존재하게 된다. 따라서  $l_c$  이상의 박막금속배선에는 항상 한계강도의 결함을 포함하게 되므로 수명의 포화를 예상할 수 있다. 이러한 임계길이는 박막금속배선의 선폭, Metallurgy 그리고 박막증착과정에 의해 결정되는 것으로 나타났다[11]. Fig. 6에는 Electromigration 실험 후 발생한 결함들이다.

### 3.3. 이중금속배선에서의 전기효과

소자의 고집적화에 따라 Interconnection 배선의 다층화가 이루어졌으며, 이러한 다층구조에서의 결함 현상에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

Fig. 7에는 전계의 크기와 극성에 따른 박막금속배선의 상대적 수명을 나타내고 있다. 전계가 인가되지

않은 경우와 비교하여  $-60\text{ V}$ 가 인가된 경우는 0.33, 그리고  $+60\text{ V}$ 의 경우에는 0.52의 상대적 수명을 갖는다. 이것은 Electromigration에 의한 박막금속배선의 수명이 인가된 전계에 의해 영향을 받는다는 것을 보여준다. 이러한 전계효과는 인가된 전압의 크기와 극성에 따라 변화한다. Electromigration 현상은 캐리어 전자와 모원자간의 운동량 교환으로 인한 금속 원자의 이동이다. 메탈 2와 절연막의 경계면에 전계가 존재하면 박막금속배선 내를 이동하는 캐리어 전자가 회절하게 된다. 그로 인하여 부분적인 전류밀도가 증가하고 Electromigration의 가속화가 이루어진다. Fig. 7로부터 회절하는 전자가 인가 전압의 크기와 극성에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 절연막과 박막금속배선(메탈 2)의 경계면에 전계에 의해 유도된 전하들과 박막금속배선 내를 이동하는 전자들간의 반응 거리는 극성에 따라 달라지게 된다. 먼저 인가 전압,  $V_a$ 가 음이라면 전자는 절연막과 박막금속배선의 경계면으로 회절하게 되며, 양의  $V_a$ 라면 전자는 박막금속배선 내로 회절하게 된다.  $V_a$ 가 음인 경우에는 전자와 경계면내 유도된 전하와의 반응거리가 가까운 반면, 양의 경우에는 멀어져 전계에 의한 효과가 감소하게 된다. 따라서 인가된 전계가 절연막과의 경계면쪽에서 이동하는 원자에 영향을 주기 때문에 양의 전계보다는 음의 전계에서의 영향이 더욱 커지게 된다. 결과적으로는 음의 전계가 인가된 경우에 Electromigration 현상의 가속화가 이루어지며 박막금속배선의 수명 또한 가속화시킨다. Fig. 8에는 상하 박막금속배선이 겹쳐진 Step 지역에서 발생한 결함 사진이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 초고집적 반도체 제조기술의 기초가 되는 여러 구조의 Al-1%Si 박막금속배선에서의 Electromigration 현상에 대한 연구를 한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전류 크라우딩 효과는 원자전속의 발산을 유발하여 Electromigration으로 인한 박막금속배선의 수명감소를 가속화시킨다.

2. Electromigration에 의한 박막금속배선의 수명은 금속배선의 길이가 증가함에 따라 급격히 감소하다가 특정 임계길이 이상에서는 금속배선의 길이에 따른 영향을 받지 않는다.

3. Electromigration으로 인한 박막금속배선의 수명은 인접한 박막금속배선간에 인가된 전계의 크기와 극성에 영향을 받는다. 특히, 음의 전계가 인가된 경우에는 Electromigration 현상의 가속화가 이루어지며, 그로 인한 박막금속배선의 수명 감소 또한 가속화된다.

#### 감사의 글

본 연구는 1993년도 교육부 학술연구조성비(반도체 분야)에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. I. A. Blech and E. S. Meleran, *J. of Appl. Phys.* **40**, 485 (1969).
2. F. M. d'Heurle, in *Proc. of IEEE* **59**, 1409 (1971).
3. M. L. Dreyer, K. Y. Fu and C. J. Varker, in *Proc. of 31th Int'l Relia. Phys. Symp.*, IEEE, eds., 304 (1993).
4. T. Satake, *Appl. Phys. Lett.* **23**, 496 (1973).
5. A. S. Oates, in *Proc. of 31th Int'l Relia. Phys. Symp.*, IEEE, eds., 297 (1993).
6. C. A. Martin, J. C. Ondrusek and J. W. McPherson, in *Proc. of 31th Int'l Relia. Phys. Symp.*, IEEE, eds., 304 (1993).
7. S. Vaidya, T. T. Sheng and A. K. Sinha, *Appl. Phys. Lett.* **36**(6), 464 (1980).
8. C. R. Crowell, C. C. Shih and V. C. Tyree, in *Proc. of 30th Int'l Relia. Phys. Symp.*, IEEE, eds., 277 (1991).
9. J. Tao, C. A. Pico, N. W. Cheung and C. Hu, in *Proc. of 8th Int'l VLSI Multilevel Interconnection Conf.*, IEEE, ed., 390 (1991).
10. M. Schoen, *J. Appl. Phys.* **51**(1), 513 (1980).
11. H. A. Schafft, T. C. Station, J. Mandel and J. D. Shott, *IEEE Trans.* **ED-34**(3), 673 (1987).