

< 연구논문 >

## 극미세 전자소자 박막배선의 결함방지 및 신뢰도 향상을 위한 절연보호막 효과

양인철 · 김진영

광운대학교 전자재료공학과  
(1995년 4월 17일 접수)

### Dielectric Passivation Effects for the Prevention of the Failures and for the Improvement of the Reliability in Microelectronic Thin Film Interconnections

I. C. Yang and J. Y. Kim

Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea  
(Received April 17, 1995)

**요 약**— 절연보호막에 따른 Al-1%Si 박막배선의 평균수명(MTF, Mean-Time-to-Failure) 및 electromigration에 대한 저항성, 즉 활성화에너지( $Q$ ) 변화 등을 측정 비교하였다. 박막배선은 5000Å 두께로 열산화막 처리된  $p$ -Si(100) 기판위에 7000Å의 Al-1%Si를 증착한 후 photolithography 공정으로 형성시켰다. Electromigration test를 위한 박막배선은 3  $\mu$ m의 폭과 400  $\mu$ m, 1600  $\mu$ m의 두 가지 길이를 가지며 절연보호막 효과를 알아보기 위해 그 위에 3000Å의 두께로 SiO<sub>2</sub>, PSG, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 등 절연보호막을 APCVD 및 PECVD를 이용하여 각각 증착시켰다. 가속화 실험을 위해 인가된 전류밀도는  $4.5 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>이었고 180, 210, 240 °C 온도에서 d.c. 인가 후의 저항변화를 측정하여 평균수명을 구한 후 Black 방정식을 이용하여 활성화에너지를 측정하였다. Al-1%Si 박막배선에서 electromigration에 대한 활성화에너지값은 400  $\mu$ m 길이의 경우 0.44 eV(nonpassivated), 0.45 eV(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> passivated), 0.50 eV(PSG passivated), 그리고 0.66 eV(SiO<sub>2</sub> passivated)로 각각 측정되었다. 1600  $\mu$ m 길이의 Al-1%Si 박막배선 실험에서도 같은 절연보호막 효과가 관찰되었다. 따라서 SiO<sub>2</sub>, PSG, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 등 절연보호막은 Al-1%Si 박막배선에서의 electromigration에 대한 저항력을 높여 결함방지 효과를 보이며 수명을 향상시킨다. SiO<sub>2</sub>의 절연보호막의 경우가 Al-1%Si 박막배선의 electromigration에 대한 가장 강한 저항력을 보이며 평균수명도 높게 나타났다.

**Abstracts**— Dielectric passivation effects on the Mean-Time-to-Failure (MTF) and the electromigration resistance, that is, activation energy for electromigration in Al-1%Si thin film interconnections were investigated. Thin film interconnections were fabricated by utilizing a photolithography process. Al-1%Si thin films were deposited onto the thermally grown 5000Å SiO<sub>2</sub> layer on  $p$ -Si(100) with the dimensions of 7000Å thickness, 3  $\mu$ m line width, and 400  $\mu$ m, and 1600  $\mu$ m lengths, respectively. In order to study dielectric passivation effects, SiO<sub>2</sub>, PSG, and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> overlayers with the thickness of 3000Å were deposited on Al-1%Si thin film interconnections by using APCVD and PECVD. The current density used in this study was  $4.5 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup> for an accelerated test condition. Temperatures of 180, 210 and 240 °C were used for measuring the activation energies, which were calculated by using the Black's equation from the measured MTF values. The calculated activation energies for electromigration were 0.44, 0.45, 0.50, and 0.66 eV for the case of non-passivated-, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> passivated-, PSG passivated-, and SiO<sub>2</sub> passivated-Al-1%Si thin film interconnections with 400  $\mu$ m line length, respectively. Similar results were also observed in Al-1%Si thin film interconnections with 1600  $\mu$ m line length. Accordingly, SiO<sub>2</sub>, PSG, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> dielectric passivations show the prevention effects on the electromigration induced failures and increase the life-

time in Al-1%Si thin film interconnections. Al-1%Si thin film interconnections with the SiO<sub>2</sub> dielectric passivation show the best characteristics of the lifetime(MTF) and electromigration resistance (activation energy).

## 1. 서 론

극소전자 디바이스의 고집적화와 더불어 박막배선의 선폭은 0.5 μm 이하의 범위로까지 축소되어지고 있다. 이는 높은 전류밀도를 초래하여 electromigration(EM)에 의한 박막배선 결함발생을 가져오고 소자수명에까지 큰 영향을 주게된다. 특히 현재 박막배선물질로서 쓰이고 있는 Al, Al-alloy는 EM에 대한 저항성이 약한 것으로 밝혀져 이보다 EM에 대한 저항성이 강한 Cu, Au로의 박막배선 연구가 진행되고 있다[1-2]. 그러나 Cu, Au 박막배선제작에서 공정상의 문제점 및 EM 이외의 다른 단점들이 계속 제기되면서 계속적인 연구를 필요로 하는 대체물질의 개발에 앞서 Al, Al-alloy 박막배선의 EM에 대한 저항성 증가를 위한 연구가 요구된다[3]. 박막배선의 외부와의 접촉을 차단시키는 절연보호막처리가 그 중 하나의 방법이며, 물질에 따라서 박막배선의 EM에 대한 특성이 달라지므로, 초고집적회로를 위하여 절연보호막 물질에 따른 Al, Al-alloy 박막배선의 EM에 대한 저항성 및 전기적 특성을 규명함으로써 기존의 공정단계를 유지하면서 박막배선의 성질개선을 할 수 있을 것으로 본다. 또한 다른 물질로 박막배선이 대체되더라도 EM에 대한 저항성 증가를 위하여 절연보호막처리하는 반드시 필요하며 앞으로 박막배선물질에 따른 절연보호막 물질의 영향을 밝혀내야 한다.

EM은 전도전자와 'saddle point'에 위치한 금속이온 간의 운동량 교환으로 발생하며 결과적으로 확산에 필요한 에너지가 금속이온에 전달됨으로써 그에 따른 물질이동을 일으킨다. 이는 전기적 개방 및 단락의 원인이 되어 소자의 수명단축과 연결된다. J. R. Black은 박막배선의 전류밀도에 따른 평균수명을 MTF(Mean-Time-to-Failure)= $Aj^n \exp(-Q/kT)$ 로 수식화하였으며 현재까지 EM test에서 이론적인 배경이 되고 있다[4]. 여기서 A는 물질상수, j는 전류밀도, n은 전류밀도에 관계되는 변수이다. 수식에서 활성화에너지 Q는 EM에 대한 저항성을 평가하는 척도가 되고, 박막배선의 전류인가에 따른 수명을 예상할 수 있게 한다. 활

성화에너지가 크면 박막배선의 물질이동이 억제되며 이는 EM에 대한 강한 저항성을 의미한다. 절연보호막 처리는 그 저항성을 크게 해주는 것으로 지금까지 밝혀졌으며 여러 절연보호막 물질에 대한 실험 및 새로운 막물질 개발이 이루어지고 있다[5, 6]. 본 연구에서는 이에 맞추어 Al-1%Si 박막배선에 SiO<sub>2</sub>, PSG (Phospho Silicate Glass), Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 절연보호막(dielectric overlayer)을 형성하고 EM에 따른 수명 및 활성화에너지를 측정하여 절연보호막 물질에 따른 박막배선의 전기적 특성을 측정 비교하여 박막배선의 성질개선을 기하고자 한다.

1960년대부터 본격적으로 시작된 절연물질 및 막성장에 대한 연구는 1970년대에 열산화법을 이용한 poly Si 절연막물질을 나오게 하였고, 1975년 J. J. Bart는 증착된 유리질박막의 결함분석에 관하여 연구하였다[7]. 1981년, Jeffery E. Gunn은 온도와 습기조건을 조절하면서 박막의 신뢰도 및 열적 안정도에 관하여 연구하였고[8], C. R. M. Grovenor는 CVD장치를 이용하여 SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, PSG, AlN, Polyimide를 증착하여 각 실험조건에 따른 절연물질의 특성에 대해 발표하였다[9]. 지금까지 밝혀진 최적의 절연보호막이 가져야할 성질은 낮은 응력, 강한 내습성, 낮은 수소기 함유량, 알칼리 이온 침투의 방지성, 금속물질과의 좋은 부착력 및 용이한 에칭공정 등이며 이 조건을 모두 만족시키는 물질개발이 진행 중이다[10]. 절연보호막의 형성은 표면박막배선 표면의 산화에 따른 corrosion을 방지하고 박막배선내의 온도구배를 줄여줘 EM에 대한 저항력을 크게 하지만 접촉된 금속막과의 열팽창률 차이 때문에 생기는 강한 인장응력은 stress에 의해 박막배선에 기공(void)을 형성시킬 수 있어서 결함발생의 원인이 될 수도 있다. 일반적으로 절연보호막의 두께가 클수록 박막배선을 외부로부터 잘 보호할 수 있지만 두께가 너무 크면 위의 응력에 의해 오히려 결함발생을 가속화시킬 수 있다. 따라서 적당한 두께의 막성장이 필요하며 특히 응력이 큰 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 및 이를 주도하는 물질을 절연보호막으로 할 경우 두께에 대한 고찰이 필요하다[11]. 한편, 초고집적회로를

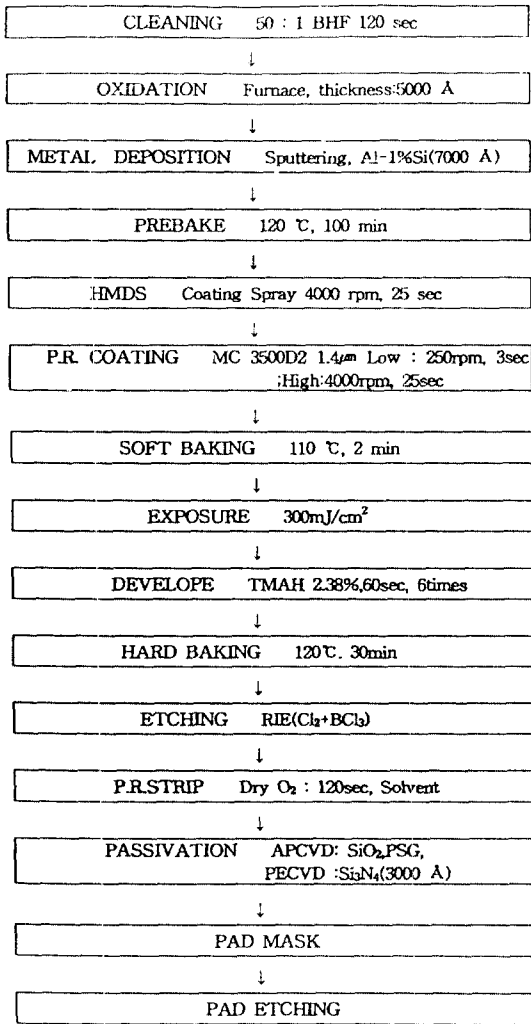


Fig. 1. A flow chart of the standard photolithography.

위하여 다층박막배선 사이에 들어가는 절연물질 (Interlevel Dielectrics)에 대한 정확한 특성 연구가 위와 함께 이루어져야 하며, 최종적으로 향후 bamboo structure를 갖는 단결정 박막배선에서 절연막을 이용한 EM에 대한 저항성 증가에 대해 논의되어야 할 것이다.

절연보호막이 각종 물질로 이루어진 박막배선에서 EM에 대한 저항력을 증가시켜 수명의 증가를 가져온다는 결과는 이미 여러 학자들에 의해 밝혀져 왔다. 그러나 현재의 극미세 전자소자의 박막배선을 이루는 Al-1%Si의 성질 개선을 위한 종합적인 고찰이 필요하

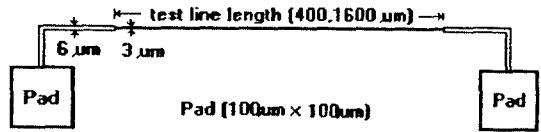
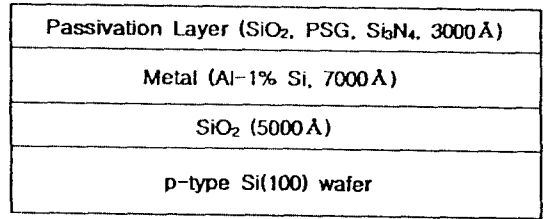


Fig. 2. The schematic diagram of test stripes.

며 본 연구는 이에 부응하여 Al-1%Si 박막배선에서 SiO<sub>2</sub>, PSG, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 절연보호막에 따른 특성을 고찰함으로써 차세대 박막배선의 성질 개선을 기하고자 한다.

## 2. 실험방법

Electromigration test를 위한 패턴은 5000Å의 열산화막이 입혀진 p-Si(100) 기판위에 7000Å의 Al-1%Si을 증착한 후 standard photolithography 공정으로 형성시켰으며 그림 1에 이에 대한 순서도를 나타내었다. 3 µm의 폭 및 400 µm, 1600 µm의 길이를 갖는 박막배선의 구조는 그림 2에 자세하게 보여지며 그 위에 보호막으로 SiO<sub>2</sub>, PSG, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>를 APCVD, PECVD로써 3000Å의 두께로 증착하였다. 박막배선에 가속화 실험조건으로 일정한 전류밀도를 인가해 주기 위해 Keithley 220 전류원을 사용하였고 전압변화는 DMM (Digital Multimeter)를 이용하여 측정하였다. 인가되는 전류밀도는 모든 시편에서 4.5 × 10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup>로 고정시켰으며 웨이퍼상에서 test되었다. 활성화에너지를 구하기 위해 hot plate를 사용하여 180, 210, 240 °C의 온도에서 실험을 진행시켰다. 활성화에너지는 Black의 방정식,  $MTF = A j^{-n} \exp(-Q/kT)$ 에서 평균수명(Mean-Time-to-Failure,  $t_{50}$ )에 대해 온도의 역수에 대한  $\ln(t_{50})$  Arrhenius plot을 취하여 구하였다[4]. 신뢰도( $\sigma$ )는 다음 식을 이용하여 구하였다.  $N$ 은 시편의 수이다[12].

$$\sigma = \left[ 1 + \frac{1}{4(N-1)} \left| \frac{\sum_{i=1}^N (\ln t_{50} - \overline{\ln t_f})^2}{N-1} \right| \right]^{1/2}$$

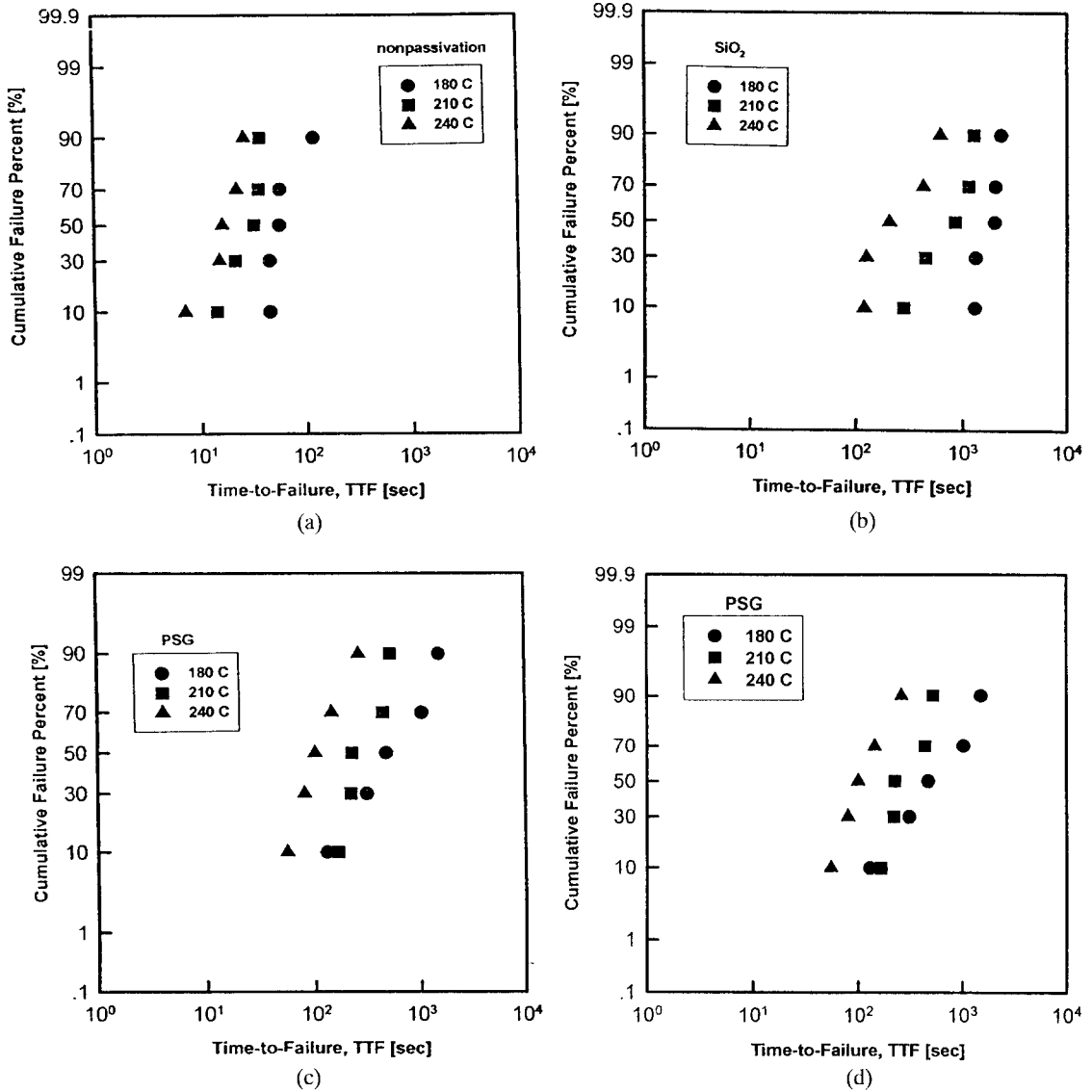


Fig. 3. Time-to-Failure (TTF) vs. Cumulative failure percent (%) of Al-1%Si interconnections with various dielectric passivation overlayer materials (400 μm) (a) nonpassivation, (b) SiO<sub>2</sub>, (c) PSG, (d) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

### 3. 결과 및 고찰

그림 3은 400 μm 길이의 Al-1%Si 박막배선에 4.5 × 10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup>의 전류밀도를 인가하였을 때 각 온도에서 EM test 후의 절연보호막 물질에 따른 시편의 수명, Time-to-Failure(TTF)에 대하여 결함발생 누적확률의 변화를 보여주고 있다. 180, 210, 240 °C에서 각각의 평균수명(MTF, t<sub>50</sub>)은 nonpassivation인 경우 60 sec ±

σ(0.42), 26 sec ± σ(0.45), 16 sec ± σ(0.54)로 나타났으며 절연보호막이 SiO<sub>2</sub>인 경우 1753 sec ± σ(0.29), 902 sec ± σ(1.16), 241 sec ± σ(0.78), PSG인 경우 497 sec ± σ(1.04), 286 sec ± σ(0.53), 111 sec ± σ(0.63), Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 115 sec ± σ(1.04), PSG일 때 344 sec ± σ(0.72), 137 sec ± σ(0.94), 71 sec ± σ(0.0)으로 하였을 때 평균수명의 증가가 가장 크게 나타났으며 이는 지금까지 밝혀진 SiO<sub>2</sub> 보호막을 이용한 수명증가 결과와 일치한다

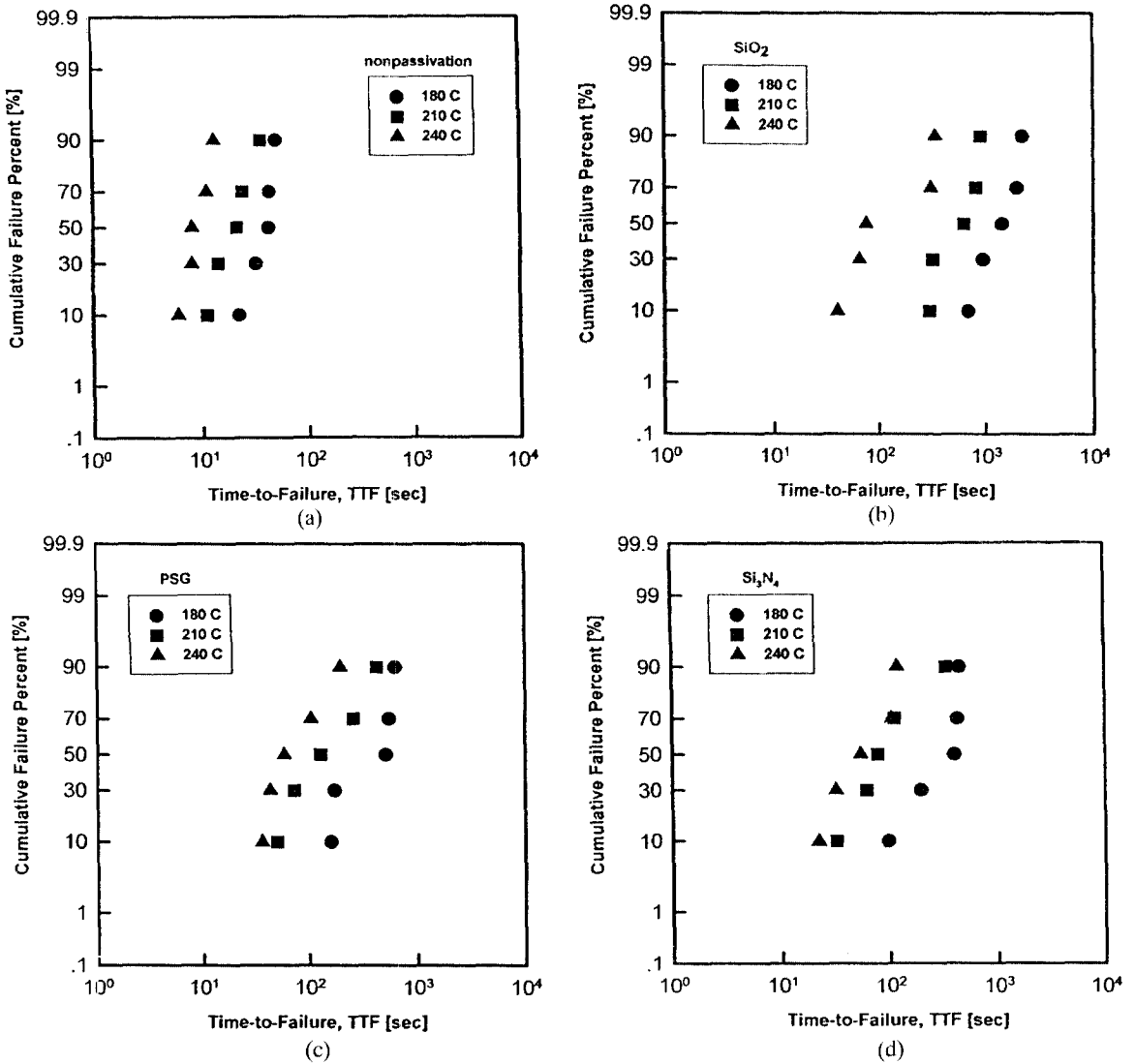


Fig. 4. Time-to-Failure (TTF) vs. Cumulative failure percent (%) of Al-1%Si interconnections with various dielectric passivation overlayer materials (1600 μm) (a) nonpassivation, (b) SiO<sub>2</sub>, (c) PSG, (d) Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

[13]. 모든 시편에서 온도가 증가할수록 초기 비저항이 높게 측정되었으며 수명은 지수함수적으로 감소하였다. nonpassivation일 때와 비교하여 절연보호막을 하였을 때 나타나는 수명의 증가는 절연막이 박막배선의 계면에서 electromigration 등에 의한 금속이온의 확산을 억제하고, corrosion 등과 같은 외부불순물에 의한 결함발생을 줄여주었기 때문인 것으로 사료된다. 그림 4는 위와 같은 실험조건으로 EM test된 1600 μm의 길이의 박막배선에서 TTF에 대한 결함발생 수

직확률의 변화를 보여주고 있다. 180, 210, 240 °C에서 각각의 평균수명(MTF,  $t_{50}$ )은 nonpassivation일 때 36 sec ± σ(0.35), 19 sec ± σ(0.53), 9 sec ± σ(0.32), 절연보호막이 SiO<sub>2</sub>일 때 1317 sec ± σ(0.52), 536 sec ± σ(0.55), 115 sec ± σ(1.04), PSG일 때 344 sec ± σ(0.72), 137 sec ± σ(0.94), 71 sec ± σ(0.73), Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>일 때 267 sec ± σ(0.70), 90 sec ± σ(0.91), 55 sec ± σ(0.77)로 절연보호막 물질에 따른 평균수명의 증가는 위의 길이 400 μm 박막배선에서의 실험결과와 같은 절연보호막효과를 보

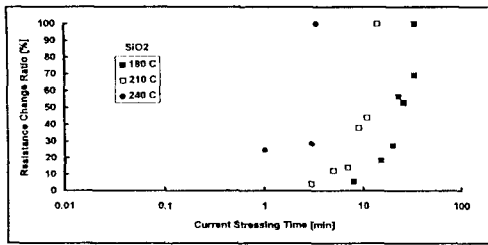


Fig. 5. Resistance change ratio (%) vs. Current stressing time (min) of  $\text{SiO}_2$  passivated Al-1%Si interconnections.

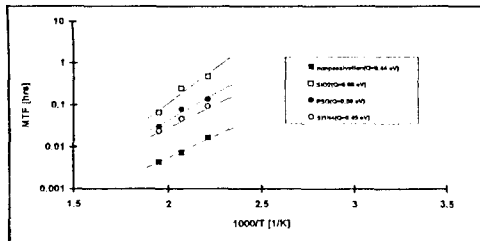


Fig. 6. Activation energy,  $Q$ , of Al-1%Si interconnections with various dielectric passivation overlayer materials (nonpassivation,  $\text{SiO}_2$ , PSG,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).

이다. 절연보호막 물질에 상관없이  $400\ \mu\text{m}$  길이의 박막배선보다  $1600\ \mu\text{m}$  길이의 박막배선의 평균수명이 짧게 나타나는 것은 길이 증가에 따른 결합수의 증가에 기인하는 것으로 사료된다[13]. 선속의 발산을 유발하는 결합들이 박막배선 전체에 고르게 분포되었다고 가정하면 길이의 증가는 결합수의 증가를 의미하며 그에 따라 강도가 큰 결합을 발견할 확률이 높아져 박막배선의 수명을 감소시킬 수 있다.

그림 5는  $\text{SiO}_2$  절연보호막 물질에 길이  $400\ \mu\text{m}$  Al-1%Si 박막배선의 d.c. 인가시간에 대한 저항변화비를 보여준다. 저항변화비 100%는 전기적 개방을 의미하며 이 때까지의 시간을 Time-to-Failure(TTF)로 하였다[12].  $400\ \mu\text{m}$ ,  $1600\ \mu\text{m}$  길이에서 모두 측정온도가 올라감에 따라 TTF는 모든 박막배선에서 감소하며 저항변화가 급격히 진행되었다. 저항변화의 불규칙한 흐름은 박막배선내의 불균질성 및 측정온도의 주기적인 편차에 기인하는 것으로 여겨진다. nonpassivation, PSG,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  passivation의 경우에도 비슷한 저항변화를 나타낸다.

그림 6은  $400\ \mu\text{m}$  길이에서 절연보호막에 따른 Al-1%Si 박막배선에서 온도에 대한 평균수명의 변화로

Table 1. Mean-Time-to-Failure (MTF, 150), activation energy of Al-1%Si interconnections with various dielectric overlayers

Passivation materials	Temp. (°C)	MTF (sec)	$\alpha$	$Q$ (eV)
nonpassivation	180	60	0.42	0.44
	210	26	0.45	
	240	16	0.54	
$\text{SiO}_2$	180	1753	0.29	0.66
	210	902	1.16	
	240	241	0.78	
PSG	180	497	1.04	0.50
	210	286	0.53	
	240	111	0.63	
$\text{Si}_3\text{N}_4$	180	337	0.40	0.45
	210	170	0.73	
	240		0.33	

서 직선의 기울기를 측정하여 Black의 실험식  $MTF = A_j \cdot \exp(-Q/kT)$ 로부터 각 박막배선의 EM에 대한 활성화에너지를 구하였다.  $\text{SiO}_2$ 를 절연보호막으로 하였을 경우  $0.66\ \text{eV}$ 로서 EM에 대한 저항성이 가장 높은 것으로 나타났으며 PSG와  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 를 하였을 경우  $0.50\ \text{eV}$ ,  $0.45\ \text{eV}$ 로서 역시 nonpassivation일 때의  $0.44\ \text{eV}$ 보다 높게 나타나 절연막을 encapsulation시킴으로써 electromigration 등에 의한 금속이온의 확산을 억제하여 물질이동을 감소시키며, 외부불순물에 의해 발생하는 corrosion 등에 대한 저항성을 증가시킴으로써 박막배선의 결합방지효과를 보이는 것으로 판단된다.  $\text{SiO}_2$  절연보호막에 의해 Al-1%Si 박막배선의 EM 및 stressmigration이 완화되고 그에 따른 큰 수명 증가가 보고된 바 있다[14, 15]. 따라서  $\text{SiO}_2$  절연보호막의 경우 Al-1%Si 박막배선에서 EM에 대한 가장 강한 저항력을 보이며 평균수명도 높게 나타났다. 절연보호막 물질에 따른 Al-1%Si 박막배선의 신뢰도( $\sigma$ )의 변화는 나타나지 않았으며 평균수명(MTF) 및 신뢰도( $\sigma$ ), 활성화에너지( $Q$ )를 표 1에 나타내었다.

#### 4. 결 론

Al-1%Si 박막배선에서  $\text{SiO}_2$ , PSG,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  등 절연보호막은 electromigration에 대한 저항력을 높이며 수명을 향상시킨다. 이는 절연보호막에 의한 물질이동 억

제효과 및 외부 부식방지 효과 때문에 사료된다. Al-1%Si 박막배선의 electromigration에 대한 활성화에너지는 길이 400  $\mu\text{m}$ 에서 non-passivation,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , PSG,  $\text{SiO}_2$  절연보호막의 경우 0.44, 0.45, 0.50, 0.66 eV순으로 나타나  $\text{SiO}_2$ 를 절연보호막으로 하였을 때 Al-1%Si 박막배선의 electromigration에 대한 저항성이 가장 크게 향상되었고 평균수명도 높게 나타났다.

### 감사의 글

본 연구는 서울대학교 반도체공동연구소의 교육부 반도체분야 학술연구조성비(과제번호 : ISRC 94-E-1104)에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. A. E. Kaloyeros and M. A. Fury, MRS Bulletin, 22 (1993).
2. J. Tao and N. Cheung, IEEE Electron Device Lett. 14(5), 249 (1993).
3. M. J. Hampden-Smith and T. T. Kodas, MRS Bulletin, 39 (1993).
4. J. R. Black, IEEE Trans. Electron Devices ED-16, 338 (1969).
5. I. De Munari and F. Fantini, IEEE Trans. Electron Devices 41(12), 2276 (1994).
6. Y. Nishimoto, N. Tokumasu, K. Fujino and K. Maeda, IEEE VMIC, 382 (1989).
7. J. J. Bart, International Reliability Phys. Symposium 13, 128 (1975).
8. J. E. Gunn, International Reliability Phys. Symposium 19, 48 (1981).
9. C. R. M Grovenor, Adam Hilger, 291 (1989).
10. S. Wolf Ph. D., Silicon Processing for the VLSI Era, Vol. 2, 276 (1990).
11. S. Wolf Ph. D., Silicon Processing for the VLSI Era, Vol. 2, 274 (1990).
12. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 10.04, F 1260-1289 (1989).
13. B. Agarwala, M. Attaro and A. Ingaraham, J. Appl. Phys. 41(10), 3945 (1970)
14. J. M. Poate etc., A Wiley Interscience Publication, 292 (1978).
15. M. Hassel Shearer and F. Quadri, IEEE Reliability Phys. Symposium, 95 (1980).