

극미세 전자소자 박막배선 재료 개선을 위한 엘렉트로마이그레이션 현상에 미치는 절연보호막 효과

박영식 · 김진영

광운대학교 전자재료공학과, 신기술 연구소
(1996년 1월 24일 접수)

Dielectric Passivation Effects on the Electromigration Phenomena for the Improvement of Microelectronic Thin Film Interconnection Materials

Y. S. Park and J. Y. Kim

Department of Electronic Materials Engineering Kwangwoon University, Institute of New Technology
(Received January 24, 1996)

요 약 - 극미세 전자소자 박막배선의 재료 개선을 위하여 절연보호막 효과가 엘렉트로마이그레이션 현상에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. Al-1%Si를 배선 재료로 사용하여 여러 가지 형태의 배선을 제작하였고, SiO₂를 근거로 하여 다양한 구조의 절연보호막을 증착하였다. 직선형배선이 선풍과 면적에 변화가 있는 배선에 비해 2~5배 정도의 긴 수명시간을 갖는다. 즉 미세구조의 불균일성에 의한 원자선속구배의 증가와 전류의 크라우딩효과가 박막배선의 수명시간을 단축시킨다. 절연보호막은 증착 물질의 차이나 증착 두께에 의존하는 수명시간을 갖는다. SiO₂층위에 PSG의 절연보호막을 증착한 시편이 Si₃N₄를 증착한 시편보다 긴 수명시간을 보인다. 이는 SiO₂층위에 PSG층이 박막에서의 스트레스를 줄여 주고, 습기나 sodium과 같은 mobile ion에 대한 저항성을 증가시켜 주기 때문으로 사료된다. 또한 동일한 증착 물질인 경우, 증착 두께에 비례하는 수명시간 의존성을 나타내었다.

Abstracts - For the improvement of microelectronic thin film interconnection materials, dielectric passivation effects on the electromigration phenomena were studied. Using Al-1%Si, various shaped patterns were fabricated and dielectric passivation layers of several structures were deposited on the SiO₂ layer. Lifetime of straight pattern showed 2~5 times longer than the other patterns that had various line width and area. It is believed that the flux divergence due to the structural inhomogeneity and so the current crowding effects shorten the lifetime of thin film interconnections. The lifetime of thin film interconnections seems to depend on both the passivation materials and the passivation thickness. PSG/SiO₂ dielectric passivation layers showed longer lifetime than Si₃N₄ dielectric passivation layers. This results from the PSG on SiO₂ layer reduces stress and from the improvement of resistance to the moisture and to the mobile ion such as sodium. This is also believed that the lifetime of thin film interconnections seems to depend on the passivation thickness in case of the same deposition materials.

1. 서 론

1969년 J. R. Black은 '금속에 높은 밀도의 전류가 인가되었을 때, 금속에서 발생할 수 있는 물질 이동(mass transport) 현상'을 엘렉트로마이그레이션(electromigra-

tion)이라 정의하였다. 이러한 엘렉트로마이그레이션 현상은 수 십년 전부터 연구되고 있으며, 현재 VLSI (very large scale integration)나 ULSI(ultra large scale integration)등의 극미세 전자소자가 등장함에 따라 반도체 소자 결합의 주요한 메카니즘으로 부각되고 있다[1]. 최

근 미국의 IBM사에서 VLSI 회로의 신뢰성을 저해시키는 결합기구로서 엘렉트로마이그레이션과 스트레สมา이그레이션을 주목하였음은 이와 같은 추세를 잘 나타내 주고 있다[2].

박막배선에서의 엘렉트로마이그레이션은 원자선속의 구배에 의하여 발생하며, 이로 인한 물질의 이동은 주로 결정립계(grain boundary)를 통하여 이루어진다. 원자선속에 영향을 미치는 주된 요인은 미세구조의 불균일성과 온도구배이며, 전자가 후자보다 더욱 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[3]. VLSI나 ULSI회로에서 bend, via, step 등 배선 구조의 급격한 변화는 metallization에서 필연적인 구조이다. 증착법이나 배선의 형태에 의존하는 박막배선의 미세구조는 이러한 구조의 배선에서 더욱 불균일하게 된다. 따라서 특정한 형태의 배선에서 전기적, 물리적 특성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며[4], 앞으로 더욱 심화되어야 할 것으로 사료된다.

지금까지 박막배선의 구조에 관한 연구로는 평균 결정립의 크기나 분포 등, 미세구조와 관련된 평균수명시간(Mean-Time-to-Failure, MTF)에 관한 것[3], 선펁에 변화가 있는 배선에서, 전류크라우딩과 관련된 수명시간의 의존성에 관한 것 등이 있다[5]. 각각의 연구 결과에 의하면, 결정립의 크기나 분포의 균일함은 평균수명시간을 증가시키며, 선펁의 변화는 평균수명시간을 단축시키는 것으로 알려져 있다.

반도체소자에서 박막배선의 평균수명시간을 증가시키기 위한 방법은 배선재료의 합금, 절연보호막의 코팅, 증착 기술의 변화 등 여러 가지 방법이 제시되고 있다. 그 중 절연보호막은 확산에 필요한 vacancy의 형성을 막아 주고 박막 표면의 broken bond를 채워 주어 수명을 증가시켜 준다[6, 7]. 일반적으로 두꺼운 절연보호막은 엘렉트로마이그레이션에 대한 저항성을 개선하여 보다 나은 보호의 역할을 하는 것으로 알려져 있으며, 보호막물질로 주로 사용되는 것은 PSG, SiO, SiO₂, Si₃N₄ 등을 들 수 있다.

본 연구에서는 박막배선의 구조가 엘렉트로마이그레이션으로 인한 물질 이동 패턴에 미치는 영향과 그에 따른 수명시간의 관계를 알아보았다. 또한 엘렉트로마이그레이션을 억제하기 위한 방법으로 절연보호막 효과에 관하여 연구하였다. 직선형배선과 선펁에 변화가 있는 배선을 제작하여 평균수명시간을 비교하였고, 선펁에 변화가 있는 박막배선은 다양한 면적과 구조를 갖도록 제작하여 평균수명시간과 기하학적 구조의 의존성에

관하여 연구하였다. 그리고 SiO₂를 근거로 한 절연보호막 위에 PSG, Si₃N₄ 등의 물질을 여러 가지 구조로 증착하여 절연보호막 물질과 증착 두께에 따른 엘렉트로마이그레이션의 저항성 향상에 관하여 연구하였다.

2. 실험방법

실험에 사용된 박막배선은 열산화법을 이용하여 SiO₂ 층을 5000 Å의 두께로 성장시킨 p형 Si(100) 웨이퍼 위에 제작되었다. 구조 효과를 알아보기 위해 제작된 시편은 photolithography 공정을 통하여 제작되었고, 절연보호막 효과에 관한 연구를 위한 시편은 electron beam lithography 공정을 이용하여 이루어졌다. 각 시편은 Al-1%Si을 배선 재료로 사용하였고 형성된 박막배선의 두께는 모두 7000 Å이다. 패턴의 제작 과정을 그림 1에 나타내었다.

구조 효과를 알아보기 위해 제작된 패턴은 직선형배선과 선펁에 변화가 있는 배선이다. 직선형배선은 1000 μm의 길이에 3 μm의 선펁을 갖도록 제작하였고 선펁에 변화가 있는 배선은 좁은 영역(narrow line)과 넓은 영역(large area)으로 구성되어 있다. 좁은 영역의 선펁은 직선형배선의 선펁과 동일한 3 μm이며, 넓은 영역은 사각형

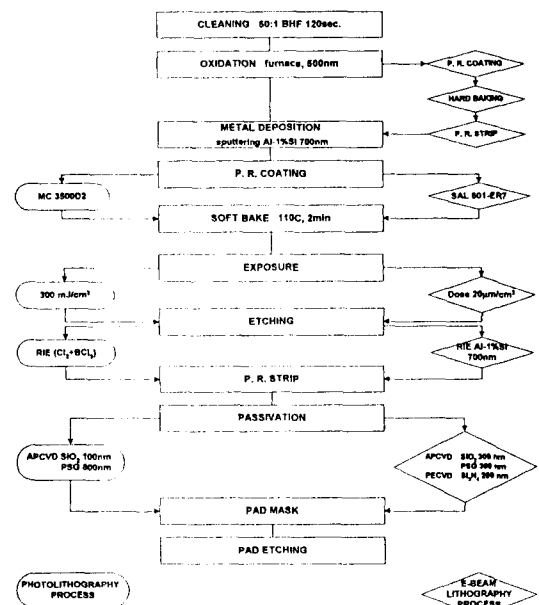


Fig. 1. Flow chart of a photolithography and an electron beam lithography process.

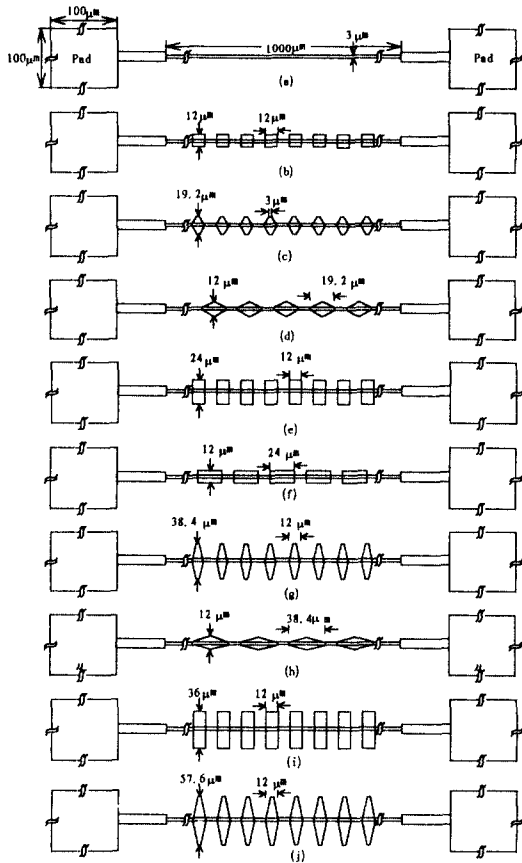


Fig. 2. The structure of test patterns.

(rectangular)과 마름모형(diamond)의 두 가지 형태로, 선포는 각각 12, 24 μm 와 19.2, 38.4 μm 이다. 따라서 배선 폭의 변화는 각각 9, 21 μm 와 16.2, 35.4 μm 가 되며, 이를 사각(rectangular) 1과 마름모(diamond) 1형 배선이라 하였다. 이와 달리 각 넓은 영역을 90°씩 회전시켜 선포의 변화를 작게 한 패턴을 사각(rectangular) 2와 마름모(diamond) 2형 배선이라 하였다. 모든 배선은 1000 μm 의 전체 길이에 20개의 넓은 영역을 포함하고 있으며, 배선의 넓은 영역을 12×12 μm^2 와 12×24 μm^2 두 가지 면적으로 제작하여 면적과 수명시간의 의존성을 알아보았다. 또한 동일한 면적의 배선에 대하여 사각 1형과 2형 배선, 마름모 1형과 2형 배선의 수명시간을 각각 비교하여 형태에 따른 수명시간의 변화를 알아보았다.

절연보호막 효과를 위해 제작된 패턴은 이와 유사한 형태로 구조 효과를 위해 제작된 패턴에서의 2형 배선이 없고, 넓은 영역의 폭이 36 μm 인 배선이 포함되어

있다. 실험에 사용된 모든 배선의 형태를 그림 2에 나타내었다.

시편은 p-Si(100)/SiO₂(5000 Å)/Al-1%Si(7000 Å)의 구조 위에, 절연보호막 물질에 따른 수명시간의 의존성을 알아보기 위하여, APCVD법을 이용하여 SiO₂(3000 Å)/PSG(3000 Å)/SiO₂(3000 Å), SiO₂(3000 Å)/Si₃N₄(2000 Å), SiO₂(3000 Å)/Si₃N₄(2000 Å)/SiO₂(3000 Å)의 세 가지 형태로 절연보호막을 증착하였다.

실험은 웨이퍼 상태에서 진행되었고, hot plate에서 270°C의 온도를 조성하여 주었다. 각 배선에 4.5×10⁶ A/cm²의 전류밀도를 인가한 후, void에 의한 회로 개방까지의 시간을 결함발생시간(Time-to-Failure, TTF)으로 하여 배선의 구조와 절연보호막에 따른 평균수명시간을 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 직선형배선과 선포에 변화가 있는 배선의 평균 수명시간

그림 3은 직선형배선과 선포에 변화가 있는 배선과의 수명시간을, 결함발생시간과 측정결함율과의 관계를 이용하여 나타낸 것이다. 그림 3의 (a)는 사각 1형의 넓은 영역을 갖는 배선과 직선형배선과의 비교로, 직선형배선이 200~400%의 긴 수명시간을 보인다. 그림 3의 (b)는 마름모 1형 배선과의 관계를 나타낸 것으로 역시 직선형배선의 긴 수명시간을 확인할 수 있다.

선포에 변화가 있는 배선이 짧은 수명시간을 나타내는 원인은 두 가지이다. 첫 번째는 좁은 영역과 넓은 영역의 경계 부근, 즉 배선의 폭이 좁아지는 부분에서 상대적인 전류밀도의 증가에 의한 온도구배이다. 배선에서의 온도구배는 물질 이동의 불균형을 유발하여 기공의 형성을 가속화시키게 된다. 이는 박막배선에서 open-circuit failure을 유발하는 것으로 알려져 있다[8]. 두 번째는 전자의 흐름이 넓은 영역에서 좁은 영역으로 이동할 때 발생하는 전류의 크라우딩효과이다. 전류의 크라우딩효과는 구조적 불균일성을 나타내는 금속 배선에서 특히 잘 발생하고, 이것이 국부적으로 엘렉트로마이그레이션의 구동력을 변화시킬 수 있기 때문에 선포의 변화가 있는 배선에서 짧은 수명시간을 나타내는 것이다[9].

그림 4는 모든 배선의 평균수명시간을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 straight는 직선형배선을 나타내고 rect.는 사각형의 넓은 영역을 갖는 배선을, dia.는 마름

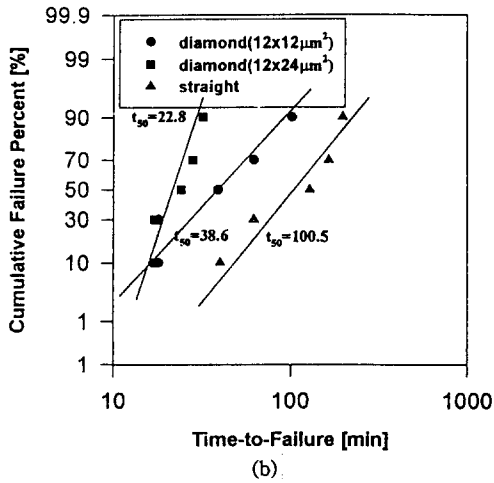
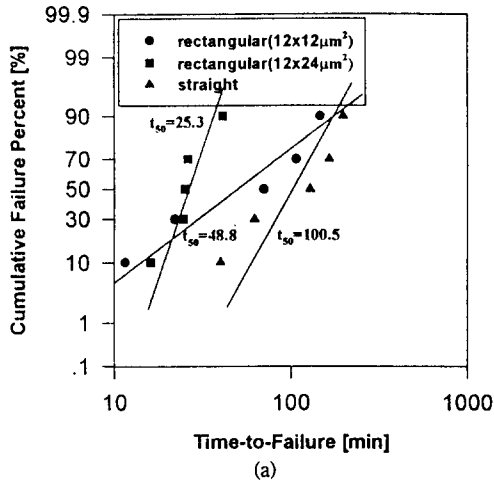


Fig. 3. Time-to-Failure(TTF) vs. cumulative failure percent (%) of Al-1%Si thin film interconnections (a) straight and rectangular shaped pattern and (b) straight and diamond shaped pattern.

모형의 넓은 영역을 갖는 배선을 나타낸다. 직선형배선의 평균수명시간은 100.5 min.으로 선폭의 변화가 있는 배선의 38.6, 41.19, 48.8, 22.8, 38.2, 25.3, 32.5 min.에 비해 작게는 200%, 크게는 500% 정도의 긴 수명시간을 갖는 것을 확인할 수 있다.

3.2. 넓은 영역의 면적에 따른 수명시간의 비교

그림 5의 (a)는 사각형 배선을, 그림 5의 (b)는 마름모형 배선의 수명시간을 나타낸 것으로 넓은 영역의 면적에 따른 수명시간을 비교한 것이다.

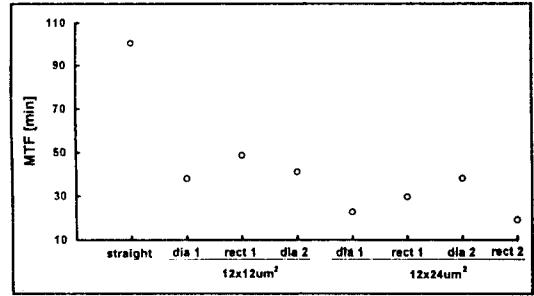


Fig. 4. Mean-Time-to-Failure(MTF) of Al-1%Si thin film interconnections with various shaped lines.

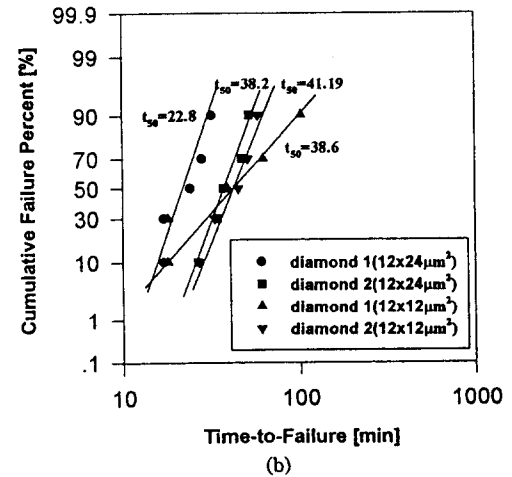
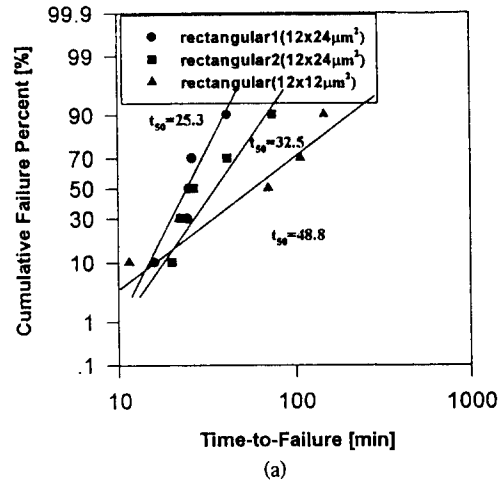


Fig. 5. Mean-Time-to-Failure(MTF) of Al-1%Si thin film interconnections with various shaped lines. (a) 12x12 and 12x24 μm² rectangular shaped pattern and (b) 12x12 and 12x24 μm² diamond shaped pattern.

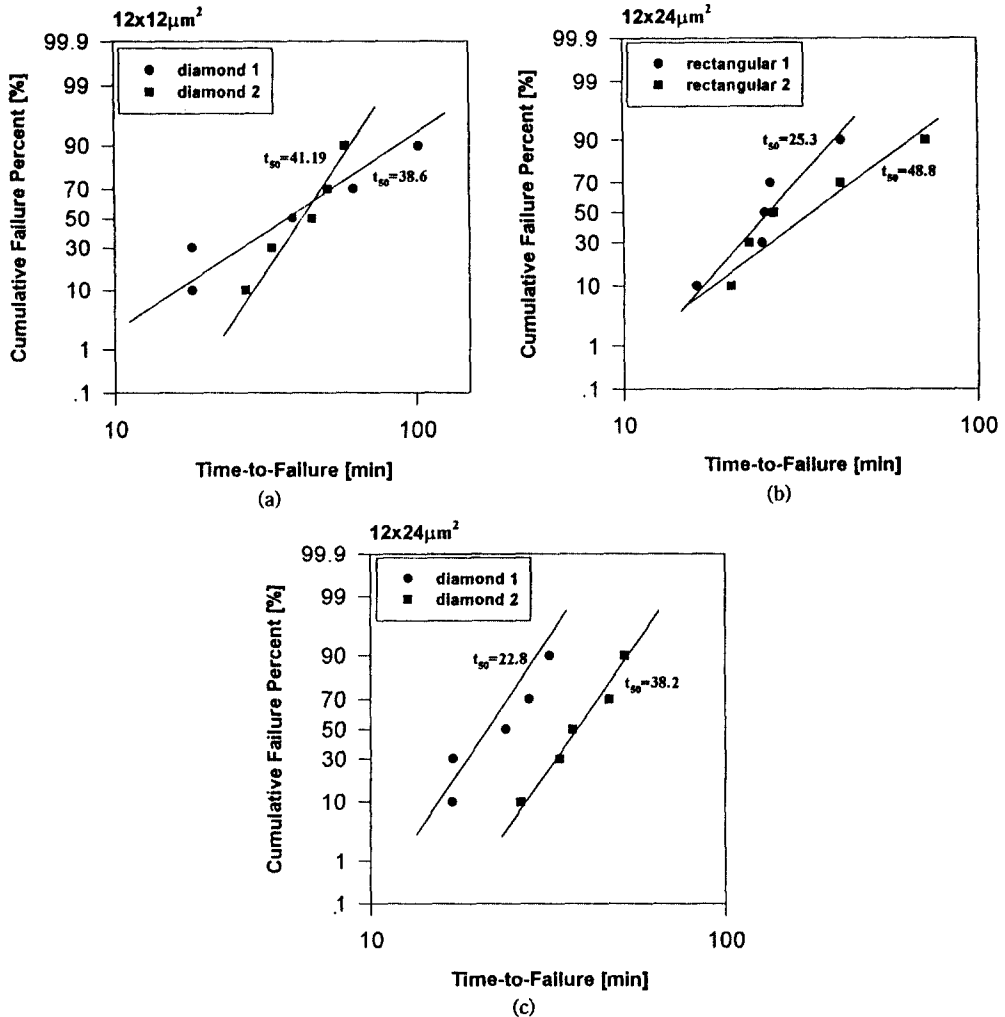


Fig. 6. Mean-Time-to-Failure(MTF) of Al-1%Si thin film interconnections with various shaped lines. (a) $12 \times 12 \mu\text{m}^2$ diamond shaped pattern, (b) $12 \times 24 \mu\text{m}^2$ rectangular shaped pattern and (c) $12 \times 24 \mu\text{m}^2$ diamond shaped pattern.

본 실험에서는 배선의 형태와 관계없이 $12 \times 12 \mu\text{m}^2$ 면적의 넓은 영역을 갖는 배선이 $12 \times 24 \mu\text{m}^2$ 면적의 배선보다 긴 수명시간을 나타내었다. 이는 물질 이동의 경로인 결정립계와 배선경계면의 증가에 의한 것이다. 즉 넓은 영역의 면적이 넓다는 것은 물질 이동의 주된 경로인 결정립계와 배선 경계면의 증가를 의미하고 이것은 물질의 이동량도 증가할 것임을 나타낸다. 좁은 영역에서 넓은 영역으로 물질이 이동할 때, 결정립계와 배선 경계면의 증가로 인하여, 좁은 영역에서 물질의 공핍이 발생하고 이는 void의 결함을 유발시킨다. 반대로 넓은 영역에서 좁은 영역으로 물질이 이동할 때는 물질 이동

경로의 감소로 인하여 hillock의 결함이 발생한다.

3.3. 넓은 영역의 구조와 수명시간의 의존성

그림 6은 같은 면적의 넓은 영역을 갖는 배선에서 구조에 의존하는 수명시간을 나타낸 것이다. 그림 6의 (b)와 (c)는 $12 \times 24 \mu\text{m}^2$ 면적의 사각형과 마름모형 배선의 수명시간을 비교한 것으로 같은 면적인 경우, 상대적으로 배선폭의 변화가 작은 사각 2형이나 마름모 2형의 배선이, 선폭의 변화가 큰 사각 1형이나 마름모 1형에 비하여 긴 평균수명시간을 보임을 알 수 있다. 이는 이전에 발표된 선폭 변화에 따른 평균수명시간의 의존성

에 관한 연구 결과와 일치한다[6]. 즉 배선폭이 증가하는 부분에서 결정립 수의 증가에 따른 결정립계의 갑작스러운 증가가 원자선속의 구배에 영향을 주어, 사각 2형이나 마름모 2형 배선에 비하여 사각 1형과 마름모 1형의 배선이 짧은 수명시간을 나타내는 것이다. 이에 비하여 그림 6의 (a)에서 나타난 $12 \times 12 \mu\text{m}^2$ 면적의 마름모형 배선의 경우는 선폭 변화의 차이가 크지 않기 때문에 유사한 수명시간을 나타내는 것으로 사료된다. 이러한 선폭 변화와 비례하는 수명시간 단축의 경향은 임계선폭까지는 뚜렷하다가 임계선폭을 넘어서면 포화될 것으로 사료된다[6].

3.4. 절연보호막에 따른 수명시간의 비교

그림 7의 (a)는 직선형배선의 결함발생시간을 절연보호막별로 나타낸 그림이다. $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 적층구조를 갖는 시편의 평균수명시간은 17.8 min.으로, 가장 긴 수명시간을 보인 $\text{SiO}_2/\text{PSG}/\text{SiO}_2$ 구조 시편의 76.7 min.에 비해 20% 정도인 수명시간을 보인다. 또한 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 의 구조를 갖는 시편도 45.2 min.으로 60% 정도의 짧은 수명시간을 나타낸다. 그림 (b)는 $12 \times 36 \mu\text{m}^2$ 면적의 넓은 영역을 갖는 사각형 배선의 결과로 직선형배선과 같은 절연보호막 의존성을 나타낸다.

시편별 평균수명시간을 그림 8에 나타내었다. O3 wafer는 $\text{SiO}_2(3000 \text{ \AA})/\text{PSG}(3000 \text{ \AA})/\text{SiO}_2(3000 \text{ \AA})$ 의 보호막을 증착한 시편이고, O4 wafer는 $\text{SiO}_2(3000 \text{ \AA})/\text{Si}_3\text{N}_4(2000 \text{ \AA})$, O5 wafer는 $\text{SiO}_2(3000 \text{ \AA})/\text{Si}_3\text{N}_4(2000 \text{ \AA})/\text{SiO}_2(3000 \text{ \AA})$ 의 절연보호막을 갖는 시편이다.

전체 배선의 평균수명시간은 O3 웨이퍼가 49.19 min.으로 가장 길게 나타났으며, O5 웨이퍼가 36.35 min., O4 웨이퍼가 21.75 min.의 순서로 나타났다. 즉 PSG층을 갖는 구조의 시편이 Si_3N_4 층만 갖는 시편에 비해서는 44%, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 의 구조를 갖는 시편에 비해서는 74% 정도의 평균수명시간을 보인 것이다. 물질에 따른 절연보호막 효과에 관한 연구에 의하면 SiO_2 의 절연보호막이 PSG나 Si_3N_4 에 비해 긴 수명시간과 높은 활성화에너지를 보였으나[10], 본 연구에 사용된 시편은 배선 재료와 접해 있는 절연보호막이 모두 SiO_2 층이므로 이 결과의 적용에는 어려움이 있을 것으로 사료된다. 본 실험의 결과는 절연보호막 물질간의 상호 작용에 의한 것으로, SiO_2 층위의 PSG층이 SiO_2 에서의 스트레스를 줄여 주고, 습기와 mobile ion인 sodium이온에 대한 저항성을 증가시켜 O3 웨이퍼의 수명 증가에 크게 기여한 것으로 보

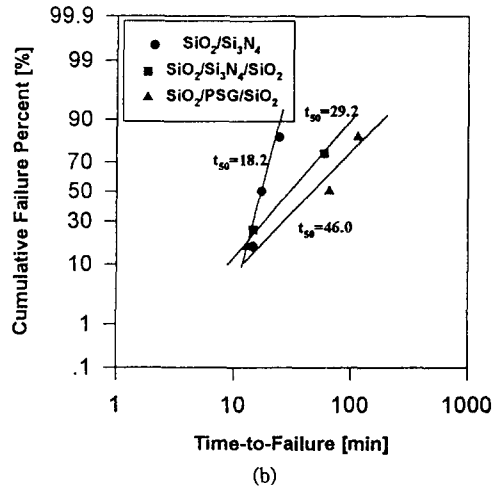
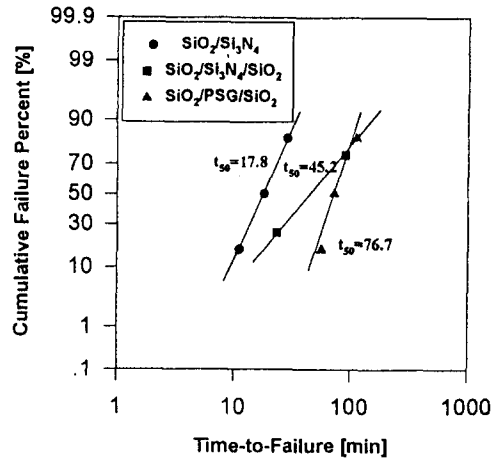


Fig. 7. Time-to-Failure(TTF) vs. cumulative failure percent(%) of Al-1%Si thin film interconnections with various passivation layers (a) straight pattern and (b) $12 \times 36 \mu\text{m}^2$ rectangular shaped pattern.

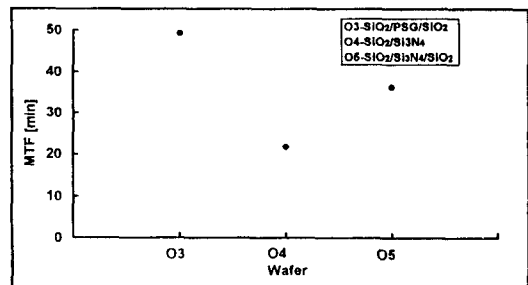
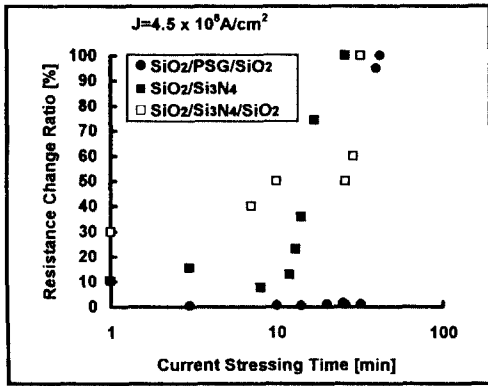
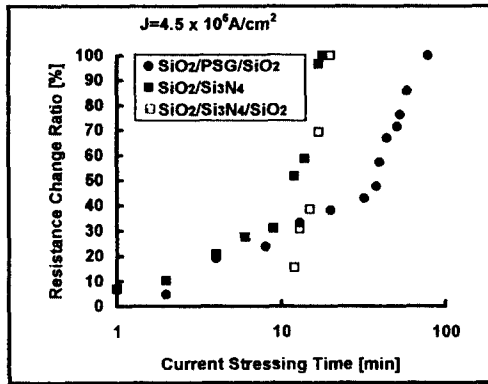


Fig. 8. Mean-Time-to-Failure(MTF) of Al-1%Si thin film interconnections with various dielectric passivation layers.



(a)



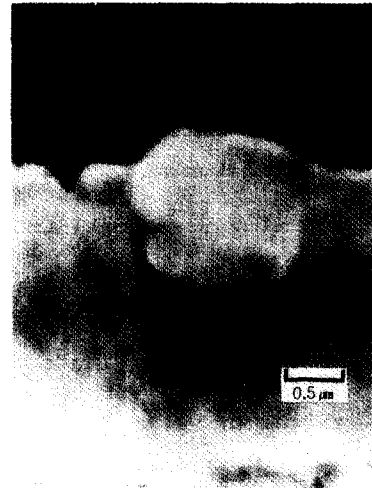
(b)

Fig. 9. Resistance change ratio(%) with current stressing time(min) of Al-1%Si thin film interconnections (a) straight pattern and (b) $12 \times 12 \mu\text{m}^2$ rectangular shaped pattern.

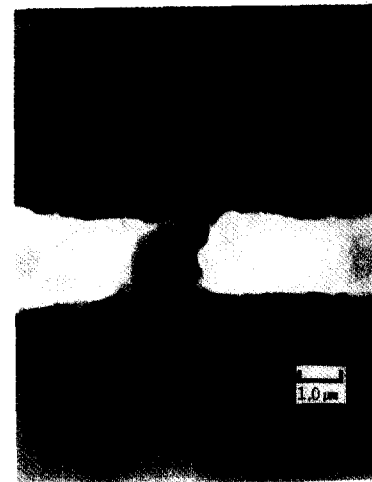
여진다[11]. 또한 SiO₂/Si₃N₄의 동일한 구조를 갖는 O4, O5 웨이퍼에서 발생한 수명시간의 차이는 3000 Å의 증착 두께 차에 의한 것으로 사료된다[12].

그림 9는 전류인가 후 각 배선에서 측정된 저항변화비이다. 그림 9의 (a)는 직선형배선에서의 결과이고, 그림 (b)는 $12 \times 12 \mu\text{m}^2$ 의 사각형 넓은 영역을 갖는 배선에서의 결과이다. 각 배선에서의 저항 값은 물질 이동에 따른 박막배선 선폭의 감소에 의해 전류 인가 시간에 비례하여 증가하는 특성을 보이며, 또한 배선의 구조와 관계없이 결함발생직전에 그 비가 급격히 증가함을 볼 수 있다.

그림 10은 테스트 후 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 엘렉트로마이그레이션에 의한 결함들이다. 그림 4의 (a)는 hillock의 모습으로, 양전류를 인가한 극쪽으로의



(a)



(b)

Fig. 10. Micrographs of electromigration induced failures observed in an Al-1%Si thin film interconnections after d.c. stressing (a) hillocks and (b) voids.

물질 이동이 명확히 나타난다. (b)는 직선형배선에서 발생한 void에 의한 결함이다.

4. 결 론

박막배선의 구조는 엘렉트로마이그레이션으로 인한 물질 이동의 패턴에 영향을 주어 수명시간의 변화를 유발한다. 선폭에 변화가 있는 배선은 미세구조의 불균일성에 의한 원자선속의 구배로 인하여 직선형배선보다

짧은 수명시간을 나타내며, 선폭 변화의 크기에 반비례하는 수명시간을 나타낸다. 또한 박막배선의 수명시간은 절연보호막 물질의 재료적 차이와 증착 두께에 의존한다. $\text{SiO}_2/\text{PSG}/\text{SiO}_2$ 구조의 절연보호막이 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 나 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ 구조의 절연보호막보다 긴 수명시간을 나타내며, 이는 SiO_2 와 PSG의 상호작용에 의한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 반도체공동연구소의 교육부 반도체분야 학술연구조성비 (과제번호: ISRC 95-E-1104)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. James R. Black, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-16 338 (1969).
2. C. K. Hu, T. P. Rodell, T. D. Sullivan, K. Y. Lee, D. P. Bouldin, *IBM J. Res. Develop.* Vol. 39 No. 4 JULY 1995.
3. Daniel Young and Aristos Christou, *IEEE Trans. Reliability*, Vol 43, no. 2, 1994 June, p. 186.
4. Takahisa Yamada, Masaru Naito and Tadahiko Hotta, *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E77-A, no. 1 1994 (January).
5. F. Jeuland, Ph. Normandon, G. Lormand, A. Poncet and A. Boudou, *VMIC conference*, 1991 (June).
6. K. G. Kemp and K. F. Poole, *ISRP*, 54-57, 1987.
7. T. Wada, H. Higuchi, and T. Ajiki, *ISRP*, 203-207, 1983.
8. Nishimura, S. Ogawa and T. Yamada, *J. Vac. Sci. Technol. B* 13(2), Mar/Apr 1995
9. R. E. Jones, L. D. Smith, *J. Appl. Phys.*, 61, p. 4671 (1987).
10. 양인철 · 김진영, *한국진공학회지* 4(2), 1995.
11. *Silicon Processing for VLSI era - vol. II* p. 196
12. L. Yan, C. Hong and D. Crook, *ISRP*, 115-118, 1985.