

<연구논문>

Al, Ag박막에서 Electromigration과 Adhesion에 관한 연구

김대일 · 전진호 · 박영래 · 최재승 · 김진영

광운대학교 전자재료공학과
(1991년 11월 7일 접수)

A study on the Electromigration and Adhesion in Al, Ag Thin Films

D.I. Kim, J.H. Jeon, Y.R. Park, J.S. Choi and J.Y. Kim

Department of Electronic Materials Engineering Kwang Woon University
(Received November 7, 1991)

요 약—본 논문은 Al, Ag박막에서 엘렉트로마이그레이션 현상에 의한 힐록, 기공형성과 접착력에 대하여 연구하였다. Mo보트를 이용하여 1×10^{-7} Torr의 진공도에서 전자-빔 증착기로 현미경용 유리기판에 약 1000 Å의 두께로 Al, Ag박막을 각각 증착하였다. Al, Ag박막에서 엘렉트로마이그레이션에 의한 결함을 연구하기 위하여 1×10^5 (A/cm²)의 d.c. 전류를 인가하였고 Scratch Method와 Tape Method로 Al과 Ag박막의 접착력을 측정하였다. 기공과 힐록, 그리고 스크래치 채널은 SEM과 광학현미경 사진을 이용하여 분석하였다. Al박막에서는 엘렉트로마이그레이션으로 힐록과 기공이 양극부분과 음극부분에서 각각 관찰되었다. 반면에 Ag박막에서는 Coulombic force에 의해 기공과 힐록이 양극부분과 음극부분에서 각각 형성되어 역엘렉트로마이그레이션 현상을 보였다. 접착력은 산소 친화력이 강한 Al박막에서 Ag박막 보다 크게 나타났다.

Abstract—The formation of hillocks and voids due to the electromigration and the adhesion force of Al and Ag thin films have been investigated. Thin films of 1000 Å thickness were deposited onto slideglass substrates by electron-beam deposition system from Mo boats in a high vacuum in the range of 10^{-7} Torr. A constant d.c. current of 1×10^5 (A/cm²) stressing has been stressed on Al and Ag thin films in order to observe the failures due to the electromigration. And the adhesion forces of Al and Ag thin films were measured by using scratch method and tape method. Hillocks and scratch channel were also characterized by utilizing scanning electron microscopy and optical microscope. In Al thin films, void formed near the negative region and hillocks formed near the positive region, which is mainly caused by the electron wind force. In contrast, Ag thin films resulted in the formation of voids near the positive region and hillocks near the negative region caused by Coulombic force. Al/glass showed stronger adhesion force than Ag/glass. This is believed to be due to the higher oxygen affinity of Al than that of Ag.

1. 서 론

고밀도, 고집적화 기술의 지속적인 발전에 의해 LSI, VLSI시대를 거쳐 현재는 ULSI 반도체 소자 시

대로 일컬어지고 있다. 이러한 집적회로의 고밀도화에서 가장 문제시되고 있는 장애요소는 박막금속화(thin film metallization)에서 제조과정이나 사용중에 발생하는 결함(failure)과 기판에서의 접착력이다.

USLI 반도체 소자에서는 박막 상호연결선(interconnection)의 폭이 마이크로미터 이하로 미세화되기 때문에 이러한 문제의 심각성은 더욱 커지고 그 해결이 매우 시급한 실정이다.

ULSI 회로 설계시 금속박막은 높은 주도도와 강한 접착력, 열적, 화학적 안정성 그리고 엘렉트로마이그레이션(electromigration) 현상에 대한 강한 저항성을 필요로 한다. 엘렉트로마이그레이션이란 높은 전류밀도나 열처리 온도와 같은 응력(stress)에 의한, 도체내 금속물질의 이동으로 기공(void)과 힐록(hillock)이 형성되어 상호연결선에서 결함을 일으키는 것을 말한다.

1969년, Black[1]은 엘렉트로마이그레이션 현상이 반도체 소자의 전기적 오픈(electrical open)을 유도한다고 발표하였고, 1973년 R.E. Hummel[2]은 Ag, Au, Cu와 같은 귀금속에서는 Al과 반대로 electron wind force에 의한 영향은 거의 무시되고, direct electrical force에 의하여 금속박막내의 Coulombic force가 물질이동의 주도적인 구동력이 된다고 발표하였다. 1985년 S.S. Lyer[3]는 입계(grain)의 구조, 크기 그리고 분포상태에 의한 힐록 형성에 관해 연구하였고, 1986년 M. Shatzkes[4]와 Ludmia, Eckertova[5]는 금속박막 내에서 Z^* 값의 차이에 따라 electron wind force(F_w)에 의한 물질이동 방향과 direct electrical force(F_e)에 의한 물질이동 방향의 상대적인 크기가 정해진다는 것을 발표하였다. 1950년 Heavens[6]는 Scratch Method를 이용하여 박막의 신뢰도(reliability) 측면에서 접착력에 대한 연구를 하였다.

본 연구에서는 박막금속화에서 제조과정이나 사용중에 발생하는 엘렉트로마이그레이션으로 인한 물질이동의 방향성을 연구하기 위해 두께 약 1000 Å의 Al과 Ag박막 stripe에 1×10^5 (A/cm²)의 D.C 전류밀도를 인가하였으며 각 물질의 산소 친화력과 관련이 있는 접착력을 측정하기 위해 Tape Method와 Scratch Method를 사용하였다. 이때 나타나는 결과를 투과광학현미경과 SEM 사진을 통해 비교 분석하였다.

2. 실험방법

박막제작에 사용한 기판은 현미경용 유리(45×25 mm/3×1 inch; Superior Co., W. Germany)로, 초음파 세척기(Rapid Graph 3069 USC 3)를 사용하여

4단계 세척을 하였다. 세척한 기판 아래에 Mask pattern(길이 2 cm, 폭 0.05 cm)을 놓고, 진공상태에서 기판 위에 남아 있을 수 있는 수분을 제거하기 위하여 할로겐 램프를 이용하여 200°C에서 3분간 기판을 가열하고 이를 실온까지 냉각하였다.

전자빔 증착기(Electron-Beam Evaporater; Annelva Co., VI-43)를 사용하여 증착전 1×10^{-7} Torr의 진공도에서 4.5 Å/sec의 증착속도로 순수 알루미늄(99.999%)과 은(99.99%, Yamanaka Co.) 박막 스트라이프를 제작하였다. 증착동안의 진공도는 1×10^{-6} Torr, 증착중 기판의 온도는 26°C, 박막의 두께는 두께측정기(Ellipsometry; Auto-Ell., Rudolph)로 보정한 XTM 결정 감지기(Crystal Sensor; IPN 007-212)를 이용하여 1000 Å를 증착하였고 SiO₂(99.99%)는 스퍼터링(Sputtering; Annelva Co. SPF-210)으로 약 5000 Å를 증착하였다. 개스 주입 전의 진공도는 1×10^{-6} Torr였고 글로우 방전(glow discharge)에는 99.999% Ar gas를 사용하였다.

Al/glass와 Ag/glass 스트라이프 양끝 전극에 프로브를 이용하여 1×10^5 (A/cm²)의 전류밀도를 각각 인가한 후, 엘렉트로마이그레이션에 의한 결함을 측정하였다. 전압 인가는 Dual D.C. Regulated Power supply(HC-2330 AD. Hanil Electronic Co.)를 사용하여 안정되게 인가하였으며, DMM(8050A, Fluke)을 이용하여 인가 전압값을 보정하였다. 박막내의 물질이동 결과인 기공과 힐록은 SEM(Jeol, JSM-35 CF)과 투과광학현미경으로 관찰하였다.

Adhesion을 측정하기 위하여 metal/glass, metal/SiO₂/glass 박막을 길이 3.8 cm, 폭 1.3 cm의 크기로 동시 증착하여 Tape Method와 Scratch Method로 측정하였다. Tape는 3M사의 scotch magic tape(12 mm×11 m)을 사용하였고, 하중의 변화는 100g, 70g, 60g, 40g으로 하였다. 그 결과는 SEM 사진으로 관찰하였다. Fig. 1(a)는 Tape test 측정장치를 도식화한 것으로, 실험절차는 tape을 붙인 후 실을 연결하고, 하중(load)을 인가하여 tape이 기판에서 분리되는 시간과 박막의 모양을 관찰한다. Fig. 1(b)는 Scratch test를 위한 측정장치를 도식화한 것이다. 박막/유리를 그림과 같이 판위에 두고 원하는 하중을 팁(tip) 위에 인가한다. 팁과 기판을 접촉한 채 연결된 도르레를 일정한 하중으로 서서히 당겨 채널을 형성시킨다. 이 방법을 통해 상대적인 접착력 강도를 추측할 수 있

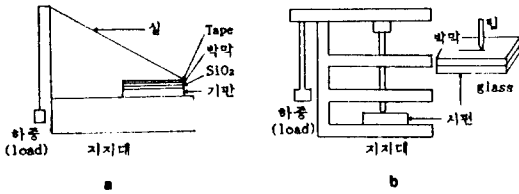


Fig. 1. Schematic representation of the tape and scratch test.
(a) Tape test. (b) Scratch test.

다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Electromigration

Fig. 2는 1×10^5 (A/cm²)의 전류밀도로 500시간을 인가한 후 엘렉트로마이그레이션으로 인해 형성된 기공의 광현미경 사진이다. 전류인가 시간이 지속됨에 따라 전자풍(electron wind)력에 의한 물질이동이 음극에서 양극방향으로 일어남으로 음극영역에서는 물질고갈 현상인 기공이 형성된다. Fig. 3(a)는 음극부분에서 형성된 기공의 SEM 사진이다. 또한 양극영역에서는 물질 축적에 의한 힐록이 형성되며 Fig. 3(b)는 힐록의 SEM 사진이다. 따라서 Al박막에서의 기공 및 힐록 형성은 전자풍(electron wind)력에 의한 엘렉트로마이그레이션 현상에 기인한다.

Fig. 4는 3×10^5 (A/cm²)의 전류밀도로 250시간 인가 후에, Ag박막의 양극부분에서 형성된 기공을 광

학현미경으로 관찰한 것이다. Al박막의 Electromigration 현상과 비교해 볼 때 이러한 기공의 형성은 양극에서 관찰되었으며 이는 역엘렉트로마이그레이션 현상으로 비교적 작은 Z^* (유효 원자가)값을 가지는 Ag박막의 경우에는 금속박막내의 Coulombic force가 electron wind force보다 더 큰 물질이동의 구동력으로 존재하기 때문이라고 판단된다[4, 5, 7].

Fig. 5(a)는 Ag박막의 양극부분의 SEM 사진으로 Coulombic force에 의해 형성된 기공을 나타내며 Fig. 5(b)는 Ag박막의 음극부분에서 금속원자들이 축적되어 쌓인 힐록의 사진이다.

3.2. 접착력 측정

Tape test에 의한 결과로, Al/glass인 경우 증착 직후와 300시간 경과 후 모두 tape으로 떼어낼 수 없을 정도로 접착력이 강했다. Ag/glass는 증착 직후의 실험에서 하중을 인가한 즉시 박막이 떨어졌고, 300시간 경과 후 접착력이 약간 증가함을 관찰할 수 있었다. 이것은 Al의 산소 친화력(42)이 매우 크기 때문에 Al원자와 유리 기판사이의 접촉면(interface)에 화학결합(chemical bond)이 형성되기 때문인 것으로 추정되며, Ag는 산소 친화력(-8)이 Al에 비해 매우 낮기 때문에 화학결합을 형성하지 못하는 것으로 생각된다.

Al/SiO₂/glass 박막에서 증착 직후와 300시간 경과 후 모두 tape으로 떼어지지 않아 SiO₂의 효과를 알 수 없었고 Ag/SiO₂/glass인 경우에는 Ag/glass와 비

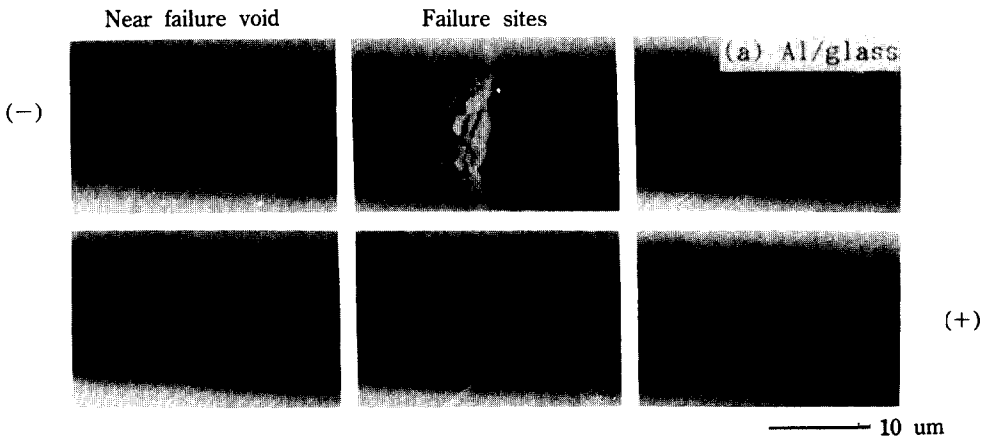
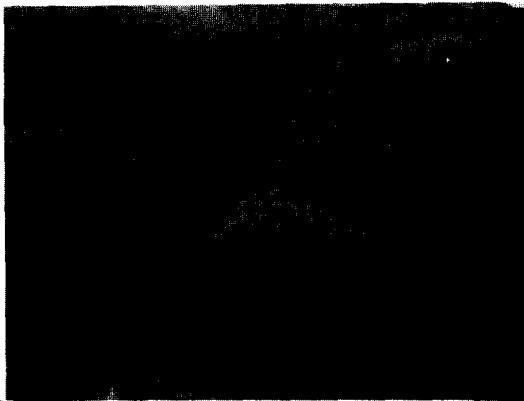


Fig. 2. Photograph showing the Al/glass stripe failure sites due to electromigration($\times 75$).



a



b

Fig. 3. Scanning electron microscopy showing the Al/glass stripe failure due to electromigration. (a) Void. (b) Hillock.

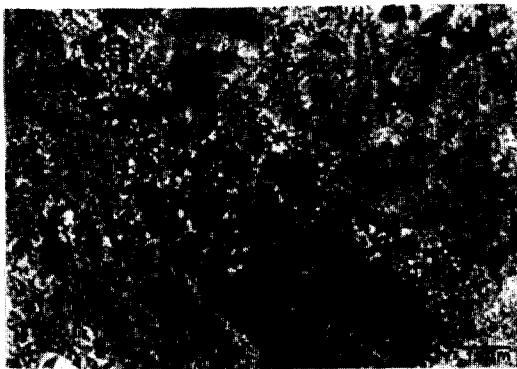
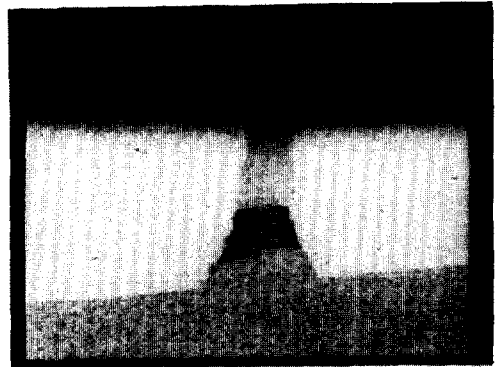
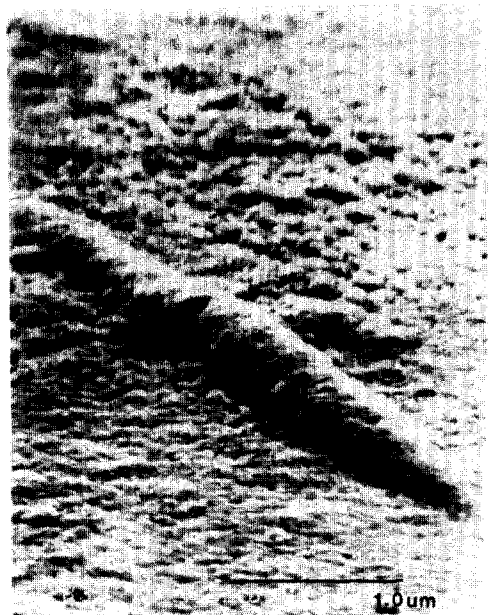


Fig. 4. Photograph showing the Ag/glass stripe void due to electromigration($\times 750$).

교하여 큰 변화가 없었다. 따라서 metal/glass, metal/SiO₂/glass 모두에서 Al이 Ag보다 접착력이 좋다는



a



b

Fig. 5. Scanning electron microscopy showing the Ag/glass stripe cathode regions due to electromigration. (a) Void. (b) Hillock.

것을 확인할 수 있었다.

Scratch method의 경우 Tape test로 관측하지 못한 Al/glass, Al/SiO₂/glass의 접착력 강도를 비교할 수 있었다. Al/glass 시편은 약 21g의 임계값(critical load)을 갖고 Al/SiO₂/glass는 약 32g의 임계값을 갖는 것으로 나타났다. 그 이유는 polishing 되어 있는 유리기판보다 SiO₂를 증착한 후의 표면조도(surface roughness)가 더 거칠어 산소와 결합한 확률이 더 높기 때문인 것으로 생각된다. Al과 Ag의 임계값은

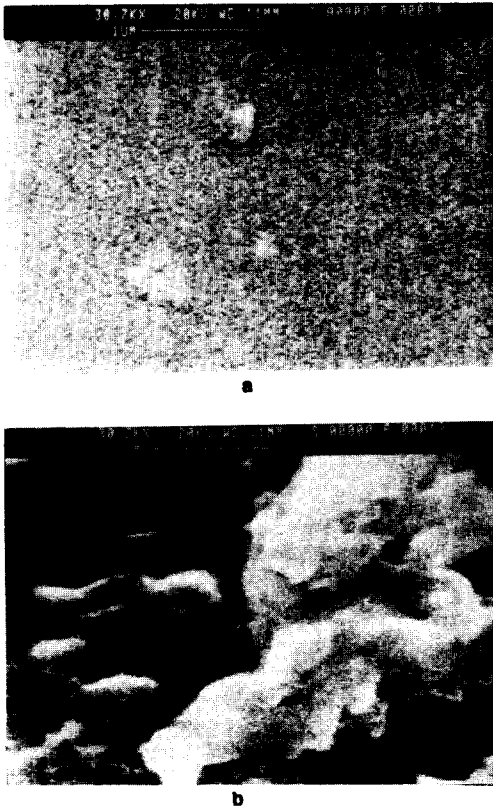


Fig. 6. Scanning electron microscopy of the channel shape.
(a) Al. (b) Ag.

각각 32g과 0.5g인 것으로 투과광학현미경으로 관찰하였다. Fig. 6은 100g의 하중을 인가한 경우에 나타난 SEM 사진 분석결과로 (a)의 Al은 Al기판과 강한 화학결합을 형성하여 팁에 의해 주변의 박막이 거의 파괴되지 않음을 보여주지만, (b)의 Ag는 화학결합을 형성하지 못하기 때문에 팁에 의해 박막이 다소 떨어짐을 볼 수 있었다. 이 결과로 보아 Al이 Ag보다 더 큰 접착력을 갖고 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 논문은 전자-빔 증착기로 증착한 Al/glass, Ag

/glass 스트라이프(길이 2 cm, 폭 0.05 cm)에 D.C. 1×10^5 (A/cm²)의 전류밀도를 인가하여 엘렉트로마이그레이션 현상으로 형성된 결합과 Al/glass, Ag/glass 및 Al/SiO₂/glass, Ag/SiO₂/glass 박막의 접착력을 측정된 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 엘렉트로마이그레이션 현상으로 Al/glass 박막은 (-)영역에 void, (+)영역에 hillock이 형성되었고 Ag/glass 박막에서는 역엘렉트로마이그레이션 현상으로 인해 (+)영역에 void, (-)영역에 hillock이 형성된다.

2. Al/glass 박막에서 물질이동의 구동력은 electron wind force이고, Ag/glass 박막의 경우에는 Coulombic force가 물질이동의 구동력이 된다.

3. 산소 친화력이 큰 Al박막의 접착력은 산소 친화력이 작은 Ag보다 크고, glass 기판 위의 SiO₂ 층은 Al박막의 접착력을 증가시키나 Ag박막의 접착력은 증가시키지 못한다.

감사의 글

본 연구는 1991년도 교육부 학술연구조성비(반도체 분야)에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. J. R. Black, *IEEE Trans. Electronic Device*, Vol. ED-16(4), 338 (1969).
2. R. E. Hummel, R. M. Breitling, *Appl. Phys. Lett.*, **18**, 9 (1973).
3. S. S. Lyer and C. Y. Wang, *J. Appl. Phys.*, **57**(10), 4594 (1985).
4. M. Shatzkes and J. R. Lloyd, *J. Appl. Phys.*, **59**, 11 (1986).
5. Lvdmila Eckertova, *Physics of thin film*, 3 (Plbvm Press, Czecho slovakia 1986) Chap. 6.
6. O. S. Heavens, *J. Phys. Red.*, **11**, 355 (1950).
7. Devendra Gupta, Paul S. Ho, *Diffusion phenomena in thin films and Microelectronic Materials*. (Noyes, publication, 1988) Chap. 7.