

절연보호막 처리된 Al-1%Si 박막배선의 Electromigration에 대한 길이 의존성 및 Cu 박막배선의 Electromigration 저항성 변화에 대한 연구

양인철 · 김진영

광운대학교 전자재료공학과
(1995년 11월 17일)

A Study on the Dependence of Length for the Electromigration in the Dielectric Passivation Overlayered Al-1%Si Thin Film Interconnections and the Electromigration Resistance of Cu Thin Film Interconnections

I. C. Yang and J. Y. Kim

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

요 약 - Al-1%Si 박막배선에서 수명의 길이 의존성 및 EM에 대한 저항성을 절연보호막 및 온도에 대하여 관찰하였고 ICB 증착된 Cu 박막배선의 EM에 대한 저항성을 측정하여 진공 열증착된 Cu 박막배선과 비교하였다. 첫째, 절연보호막 처리된 Al-1%Si 박막배선에서 길이가 200 μm 에서 1200 μm 로 증가함에 따라 전류인가에 의한 평균 수명과 활성화에너지값이 감소하다가 임계길이에서부터는 모두 포화되는 것으로 나타났다. 절연보호막 물질에 상관 없이 고온으로 갈수록 임계길이가 짧아지며 그것을 넘는 영역에서는 길이에 대한 의존성이 약해져 임계길이 이상을 갖는 박막배선인 경우 평균수명 및 활성화 에너지값은 길이보다 막특성에 의존하는 것으로 사료된다. 둘째, ICB 증착된 Cu 박막배선의 d.c.인가에 따른 평균 수명은 진공 열증착된 Cu 박막배선보다 길게 나왔으며 electromigration에 대한 활성화 에너지값도 1.70 eV로 1.33 eV보다 높게 측정되어 EM에 대한 저항성이 증가한 것으로 나타났다.

Abstracts - Length dependence of the lifetime and the EM resistance with the various dielectric passivation overlayers and the change of temperatures for Al-1%Si thin film interconnections were investigated. And the EM resistance of Cu thin film interconnections deposited by using ICB is compared with the EM resistance of Cu thin film interconnections by using thermal evaporation. First, the Mean-Time-to-Failure (MTF) and the activation energy are decreased until the critical length, that is, saturated point as the line length is increased from 200 μm to 1200 μm in Al-1%Si thin film interconnections with a dielectric passivation overlayer. The critical length is decreased as the temperature is increased showing no relation to the passivation materials, the MTF and the activation energy are dependent on rather thin film characteristics than line lengths in the region longer than the critical length for thin film interconnections. Second, the lifetimes of ICB deposited Cu thin film interconnections under an applied d.c. are observed to be longer than the lifetimes of thermal evaporated Cu thin film interconnections, and also the activation energy of ICB deposited Cu thin film interconnections of 1.70 eV which is larger than the activation energy of thermal evaporated Cu thin film interconnections of 1.33 eV shows the stronger resistance to the EM in thin film interconnections.

1. 서 론

고밀도 고집적화에 따른 소자의 축소화는 내부를 이

루는 박막배선의 폭을 감소시킴으로써 고정된 전류하에서 고전류밀도 유기에 의한 많은 문제점을 발생시키고 있다. 특히 박막배선을 따라 나타나는 온도구배가 이에

의해 가속 되어 확산에 의한 물질이동이 커지게 되며 전기적 단락 및 개방과 같은 결함발생의 요인이 된다. 위와 같은 EM(EM) 현상은 선폭이 0.5 μm 이하로 내려가는 현재의 초고집적회로(Ultra Large Scale I.C)의 수명에까지 영향을 줄 수 있는 것으로 제기되어 이에 대한 개선연구가 여러 방법으로 진행되어지고 있다[1,2]. 지금까지 박막배선 물질로서 가장 일반적으로 쓰이고 있는 Al, Al-alloy는 공정상의 잇점 때문에 앞으로도 계속 사용되어질 것으로 기대되나 Al, Al-alloy의 EM에 대한 낮은 저항성을 보완하는 것이 시급하며 절연보호막 처리와 같은 개선책이 발표되고 있다[3]. 또한 새로운 박막배선 물질에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며 Cu, Au는 고전기전도도 물질이면서 EM에 대한 강한 저항성을 갖는 것으로 보고되고 있다[4]. 본 연구는 이에 부응하여 기존의 Al, Al-alloy 박막배선 기하학적 구조, 특히 길이에 대하여, 설계에 따른 EM 저항성을 고찰하고 차세대 박막배선 물질로 기대되는 Cu에 대하여 진공 열증착(thermal evaporator) 및 이온 클러스터 빔 증착(Ion Cluster Beam Deposition; ICB)을 이용하여 증착방법에 따른 박막배선의 전기적 수명특성 및 EM 저항성을 확인하여 향후 연구방향에 대하여 논한다.

Photolithography 공정으로 제작되는 지금의 Al, Al-alloy 박막배선은 길이에 따라 그 수명이 달리 나타나며 선폭, 두께와 함께 전기적 특성에 영향을 줄 수 있는 중요한 인자가 되고 있다. 따라서 이에 대한 정확한 파악은 소자간을 연결하는 박막배선 제작에 있어서 설계시 고려사항이 될 수 있다. 선속의 발산을 유발하는 결함들이 박막배선 전체에 고르게 분포되었다고 가정하면 길이의 증가는 결함수의 증가를 의미하며 그에 따라 강도가 큰 결함을 발견할 확률이 높아져 박막배선의 수명을 감소시킬 수 있다[5]. 그러나 절연 보호막 물질 및 온도에 따라 박막배선의 농도구배와 온도구배가 달라져 길이구간에 따라 수명변화율이 달라지므로 길이증가에 따른 수명 감소구간과 포화영역을 찾아내야 하며 EM에 대해 큰 저항성을 가질 수 있는 최적의 배선길이를 설계함으로써 안정한 성질을 갖는 소자제작을 가능케 해야 할 것이다. 또한 EM 저항성을 크게 해 줄 수 있는 개선책 중에 하나인 절연보호막 처리에서 물질, 길이 및 온도에 따른 수명특성이 달라지므로 이에 대하여 종합적으로 관찰 비교함으로써 기존의 공정단계를 유지함과 동시에 Al, Al-alloy 박막배선의 성질개선을 할 수 있어야 할 것이다.

ICB 증착은 운동에너지(kinetic energy)를 갖는 이온 클러스터를 이용하는 방법으로서 기판 표면을 따라서 물질이동이 일어나므로 본래의 막성질을 얻을 수 있고 가속 전압과 이온화 전류에 의해 표면 및 계면을 제어할 수 있다[6]. 1972년에 시작되어 계속 발전된 이 방법은 표면을 손상시키지 않으면서 결정성 향상을 가져온다는 장점때문에 극미세 전자소자에 응용될 것으로 기대되며 [7], 특히 EM에 대한 저항성이 매우 좋아 차세대 박막배선 물질로 각광받는 Cu 박막 제작시 다른 증착방법에 비해 큰 성질개선을 할 수 있는 것으로 밝혀져 본 연구에서도 이에 대한 가능성을 아울러 제시하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 절연보호막 처리된 Al-1%Si 박막배선의 길이에 따른 전기적 특성 실험

EM test를 위한 패턴은 5000 nm의 열산화막이 입혀진 p-Si(100) 기판위에 700 nm 두께의 Al-1%Si를 증착한 후 표준 photolithography 공정으로 형성시켰다. 3 μm 의 폭 및 200, 400, 800, 1200 μm 의 길이를 갖는 박막배선 위에 보호막으로 SiO₂, PSG, Si₃N₄를 APCVD, PECVD로써 300 nm의 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 $4.5 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 로 고정시켰으며 웨이퍼상에서 test되었다. 활성화 에너지를 구하기 위해 hot plate를 사용하여 180, 210, 240°C의 온도에서 실험을 진행시켰다. 활성화 에너지는 Black의 방정식, $MTF = A_j \exp(-Q/kT)$ 에서 평균수명(Mean-Time-to-Failure, t_{50})에 대해 온도의 역수에 대한 $\ln(t_{50})$ Arrhenius plot을 취하여 구하였다[8].

2.2. 진공 열증착 및 ICB 증착된 Cu 박막배선의 EM 특성 비교

Thermal evaporator로 진공증착시 증착중 진공도는 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ Torr, 증착률은 0.2 nm/s이며 ICB 증착인 경우 각각 1.7×10^{-6} Torr, 0.03 nm이다. 마스크 패턴은 두 가지 경우에 대해서 모두 100 μm 의 선폭과 5000 μm 의 길이를 가지며, 측정시 probe와 증착 표면의 접촉 저항을 줄이기 위하여 접촉부를 크게 하였다. 기판은 Al-1% Si 박막배선의 제작때처럼 열산화막 SiO₂가 500 Å 입혀

진 P형 (100) Si 웨이퍼를 사용하였다. 진공 열증착된 Cu막의 평균 두께는 50 nm이었고 ICB 증착된 Cu막은 800 nm이었으며 초기 불량시편은 EM test전 광학현미경 및 전기저항측정을 통해 제외시켰다. 인가되는 전류 밀도는 2×10^6 A/cm²로 모두 고정시켰으며 100°C, 130°C, 분위기 온도에서 실험이 진행되었다. 평균수명, 활성화 에너지 및 신뢰도를 구하는 방법은 위의 Al-1% Si 박막배선 실험과 동일하다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 절연보호막 처리된 Al-1%Si 박막배선의 길이에 따른 전기적 특성

그림 1은 길이 절연보호막이 없을 때, 200, 400, 800, 1200 μ m 길이의 Al-1%Si 박막배선에 대하여 4.5×10^6 A/cm²의 전류밀도를 인가하였을 때의 평균 수명의 변화를 나타낸다. 이로부터 계산된 평균 수명은 180°C에서 76, 60, 49, 40 sec, 210°C에서 51, 26, 32, 25 sec, 240°C에서 20, 16, 15, 12 sec로서 길이가 증가함에 따라 감소한다. 180°C에서 길이가 1200 μ m로 증가할 때까지 계속적인 감소가 나타나 이 길이를 넘는 1500 μ m 부근에서 포화점이 나타날 것으로 기대되는데 반해서 240°C에서는 400 μ m에서부터 수명의 포화가 나타나 온도가 증가함에 따라 임계길이(critical length)가 줄어드는 것으로 보여진다. 온도증가에 따른 임계길이의 감소는 금속 이온의 확산이 활발해져서 상대적으로 짧은 길이에서도

결함발생이 커졌기 때문인것으로 사료된다[9]. 전체적으로 길이 증가에 따른 수명의 감소는 결함수의 증가에 따라 결함발생 확률이 높아진 것으로 해석된다. 또한 각 길이의 증가에 따라 평균 초기저항값이 높게 나타나 전류인가에 따라 주열열 발생정도가 다른 것으로 볼 수 있으며 온도구배의 차이가 커진 것으로도 판단된다[10]. 임계길이에서부터 평균 수명의 변화가 극히 작아지는 것은 결함들이 미치는 영향이 작아졌기 때문인 것으로 사료된다. 즉, 결함들의 강도에는 한계치가 존재하는데 그 한계치를 넘어서게 될 때 수명의 포화가 예상되며 임계길이에서 한계치가 나타나게 된다. 절연보호막이 없는 상태이므로 이는 Al-1%Si 박막배선 자체의 특성으로 볼 수 있다. 한편 포화영역을 결정하는 임계길이는 선폭 및 막 상태에 따라 달라질 수 있으므로 박막 증착과정에서의 변수에 따라 달라질 수 있을 것으로 사료된다.

그림 2는 SiO₂를 절연 보호막으로 한 Al-1%Si 박막배선의 전류인가에 따른 평균 수명특성 실험으로서 조건은 위의 비절연 보호막일 때와 같다. 200 μ m에서 1200 μ m로 길이가 증가함에 따라 평균 수명은 180°C에서 3328, 1753, 1058, 1286 sec, 210°C에서 1224, 902, 550, 614 sec, 240°C에서 412, 241, 205, 187 sec로 감소하는 경향을 나타낸다. 240°C일 때를 제외하면 800 μ m에서부터 수명의 포화가 나타나기 시작하였다. 이로부터 800 μ m 전후에서 임계길이가 존재하는 것으로 판단된다. 1200 μ m에서 수명이 증가한 것은 막 특성과 관련되어진다. 즉, 임계길이이상에서부터는 평균 수명이 박막

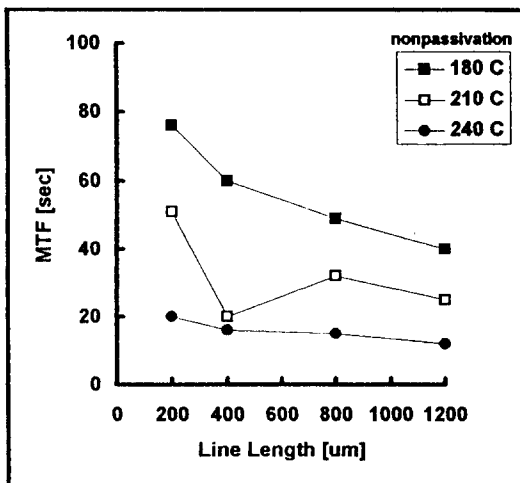


Fig. 1. Length Dependence of Non-passivated Al-1%Si Interconnections.

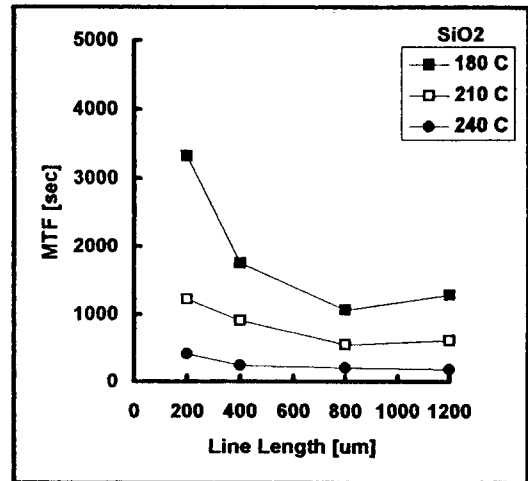


Fig. 2. Length Dependence of SiO₂ Passivated Al-1%Si Interconnections.

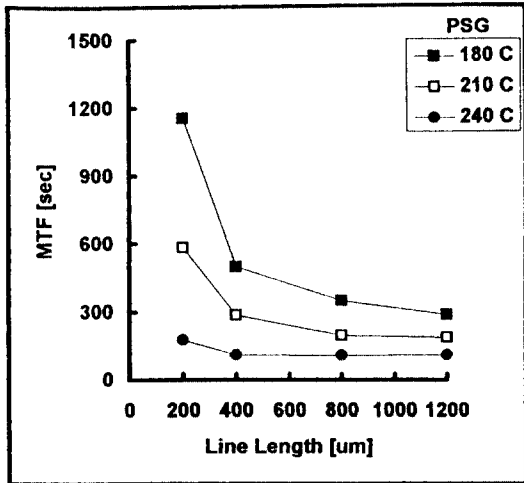


Fig. 3. Length Dependence of PSG Passivated Al-1%Si Interconnections.

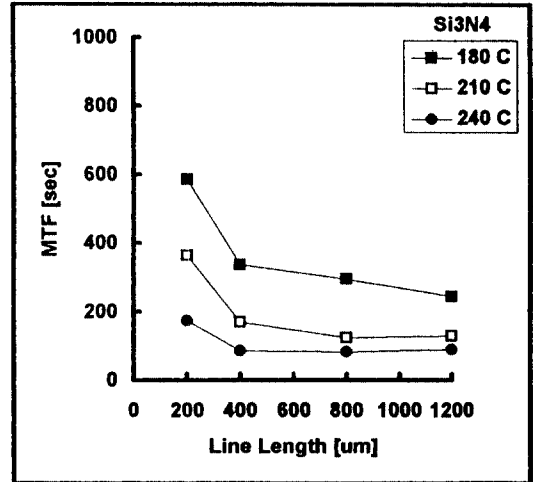


Fig. 4. Length Dependence of Si₃N₄ Passivated Al-1%Si Interconnections.

배선길이보다는 막 상태에 영향을 더 받아 평균 수명의 미세한 증감이 나타나는 것으로 판단된다.

그림 3은 PSG를 절연보호막으로 하였을 때의 길이에 따른 평균 수명의 변화를 나타낸다. 평균 수명은 180°C에서 1153, 497, 351, 288 sec, 210°C에서 584, 286, 197, 187 sec, 240°C에서 178, 111, 110, 111 sec로 나타났다. 180°C에서는 계속적인 수명감소가 보여지고 있고 임계 길이는 800 μm에서부터 1200 μm 사이에 존재할 것으로 판단된다. 210°C에서는 800 μm까지 수명의 감소가 분명하게 나타났으며 그 이후에 수명의 포화가 확실히 보여진다. 240°C에서는 400 μm부터 수명의 포화가 나타나고 있다. 따라서 온도가 증가함에 따라 임계길이가 짧게 나타나고 있다.

그림 4는 Si₃N₄를 절연보호막으로 하였을 때의 길이에 따른 평균 수명의 변화를 나타낸다. 200 μm에서 1200 μm로 길이가 증가함에 따라 평균 수명은 180°C에서 585, 337, 296, 245 sec, 210°C에서 365, 170, 124, 129 sec, 240°C에서 174, 86, 83, 90 sec로 나타나 전반적으로 위에서 보여진 수명특성과 유사하다. 따라서 고온으로 갈수록 임계길이가 감소하는 것으로 판단된다.

종합적으로, 절연보호막 물질에 상관없이 박막배선의 길이가 증가함에 따라 평균 수명은 감소하며 포화구간이 나타난다. 그러나 절연보호막 물질과 온도에 따라 수명의 포화구간이 달라지며 그에 따라 임계길이도 다르게 나타난다. 평균수명이 가장 길게 나타나는 SiO₂ 절연보호막 처리시, 임계길이는 180°C, 210°C에서 800 μm

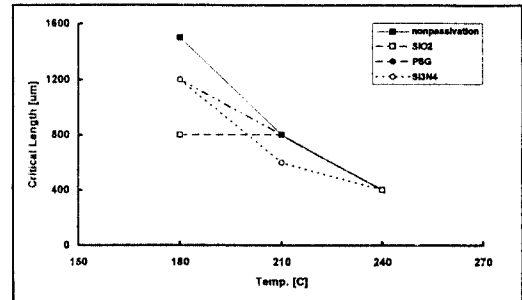


Fig. 5. Critical Lengths for Temperature in the Al-1%Si Interconnections with Various Dielectric Passivation Overlay Materials.

전후에서 보여지며 240°C에서는 400 μm 부근에서 나타났다. 비절연보호막시 180°C에서 임계길이가 가장 길게 나타났으며 240°C에서는 모든 시편에 대하여 임계길이가 비슷하게 나타났다. 그림 5는 온도 및 절연보호막에 따른 임계길이의 변화를 나타낸다. 240°C에서 모든 박막배선의 임계길이가 400 μm를 나타내고 있다.

그림 6은 절연보호막에 따른 Al-1%Si 막막배선에서 길이에 따른 활성화 에너지값을 나타내고 있다. 평균 수명과 마찬가지로 길이가 증가함에 따라 값이 감소하는 경향을 나타내며 800 μm 부근에서부터 어느정도 일정한 활성화 에너지값이 보여진다. 이는 평균 수명특성과 유사하다. 길이에 따른 활성화 에너지 변화율은 SiO₂를 절연보호막으로 하였을 경우 가장 크게 나타났으며 비절연보호막시 가장 작게 나타났다. SiO₂ 절연보호막시

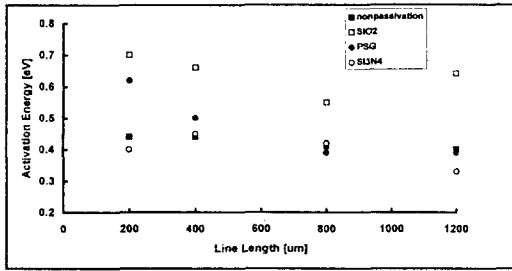


Fig. 6. Length Dependence of Activation energy in the Al-1%Si Interconnections with Various Dielectric Passivation Overlayer Materials.

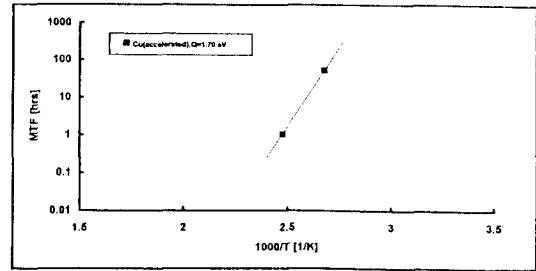


Fig. 8. Activation Energy, Q, of ICB Deposited Cu Films.

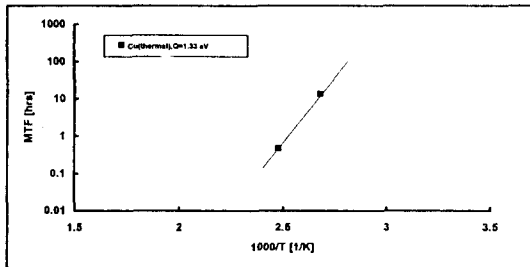


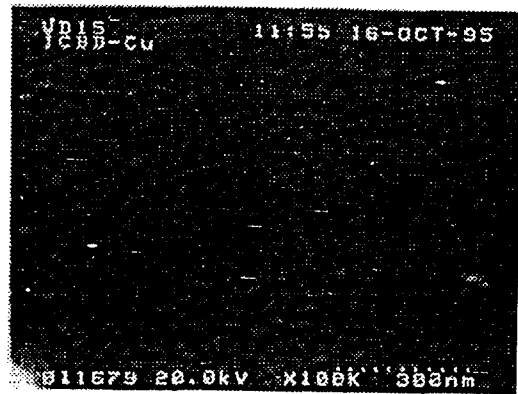
Fig. 7. Activation Energy, Q, of Thermal Evaporated Cu Films.

1200 μm에서 활성화 에너지값이 증가하는 것은 막특성에 기인한 것으로 여겨진다. 즉, EM에 대한 저항성은 길이가 증가함에 따라 감소하다가 800 μm 부근에서부터는 길이에 의한 것이기 보다는 역시 막 특성에 의존하여 활성화 에너지값이 결정되는 것으로 판단된다. 따라서 보다 긴 길이를 갖는 박막배선의 제작시, 미세구조의 균질성이 요구된다.

3.2. 증착방법에 따른 Cu 박막배선의 EM 특성

그림 7과 8은 진공 열증착 및 ICB 증착된 Cu 박막배선에 2×10^6 A/cm²의 전류밀도를 인가하였을 때의 평균 수명과 활성화 에너지 값을 나타내고 있다. 진공 열증착된 박막배선인 경우 평균 수명은 100℃에서 48,168 sec, 130℃에서 1,728 sec로 나타났으며 ICB 증착된 경우 각각 196,200 sec, 3,790 sec로 나타나 후자인 경우에서 평균 수명이 매우 크게 나타났다. 이것은 결정성 향상 및 양질의 표면에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 결정립계를 통한 EM이 줄어들었고 선편이 고르게 되어 국부적으로 강한 전류밀도 유기를 감소시킨 것으로 사료된다.

EM에 대한 저항성을 나타내는 활성화 에너지값은 진



(a)



(b)

Fig. 9. SEM of ICB Deposited Cu Films (×100,000) (a) before EM Test (b) after EM Test.

공 열증착된 경우 1.33 eV, ICB 증착된 경우 1.70 eV로 나타나 평균수명 특성과 동일하게 나타나고 있다. 따라서 실온으로 갈수록 수명의 차이는 커질 것으로 판단되며 ICB 증착을 이용한 Cu 박막배선이 앞으로 기대된다.

그림 9는 ICB 증착된 Cu 박막배선에서 테스트 전, 후의 표면 구조를 나타낸다. (a)는 테스트 전으로서 균질한

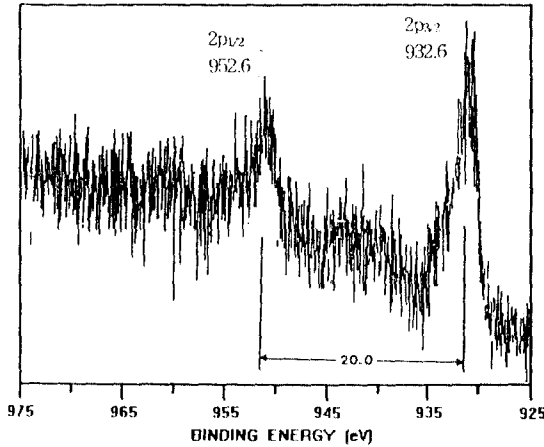


Fig. 10. XPS Surface Analysis of ICB Deposited Cu Film after EM Test.

표면 구조를 보이며 (b)는 테스트 후로서 표면에서 다른 물질과 반응한 모습이 나타난다. 이는 Cu가 외부의 산소와 결합한 것으로서 EM에 의한 결합 발생을 가속화시킬 수 있는 요인이 되며 절연보호막 처리를 통하여 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다[11]. 그림 10은 그림 9(b)의 시편을 XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy) 표면 분석한 그래프로서 CuO의 생성이 보여진다.

4. 결 론

절연보호막 처리된 Al-1%Si 박막배선에서 길이가 200 μm에서 1200 μm로 증가함에 따라 전류인가에 의한 평균 수명과 활성화 에너지값이 감소하다가 임계길이에서부터는 모두 포화되는 것으로 나타났다. 절연보호막 물질에 상관없이 고온으로 갈수록 임계길이가 짧아지며 이 길이를 넘을 경우 길이에 대한 의존성이 약해진다. 따라서, 임계길이 이상을 갖는 박막배선인 경우

평균수명 및 활성화 에너지값은 길이보다 막특성에 의존하는 것으로 사료된다. ICB 증착된 Cu 박막배선의 전류인가에 따른 평균 수명은 진공 열증착된 Cu 박막배선보다 길게 나왔으며 활성화 에너지값도 1.70 eV로 1.33 eV보다 높게 나타나 EM에 대한 저항성이 증가한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 1994년도 한국과학재단 핵심전문 연구과제(941-0800-007-2)에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다. 아울러 ICB Cu 증착에 많은 도움을 주신 한국과학기술연구원 고석근 박사님, 윤영수 박사님 그리고 김기환 연구원님께 감사드립니다.

참고문헌

1. M. L. Dreyer etc., IRPS **31**, 304 (1993).
2. J. Cho and C. V. Thomson, Appl. Phys. Lett. **54**, 2577 (1989).
3. I. De Munari and F. Fantini, IEEE Trans. Electron Devices **41**(12), 2276 (1994).
4. I. C. Yang and J. Y. Kim, J. Korean Vac. Sci. **4**(1), 60 (1995).
5. B. N. Agarwala, M. J. Attaro and A. P. Ingaraham, J. Appl. Phys. **41**(10), 3945 (1970).
6. Gikan H. Takaoka, Junzo Ishikawa and Toshinori Takagi, J. Vac. Sci. Technol. **A8**(2), 840 (1990).
7. Isao Yamada and Gikan H. Tokaoka, Jpn. J. Appl. Phys. **5A**(32), 2121 (1993).
8. J. R. Black, IEEE Trans. Electron Devices **ED-16**, 338 (1969).
9. H. A. Schafft, IEEE Trans. Electron Devices **ED-34**(3), 664 (1987).
10. P. Madakson, J. Appl. Phys. **70**(3), 1380 (1991).
11. H. K. Kang, I. Asano, IEEE-VMIC, 223 (1993).