

극소전자 디바이스를 위한 박막배선재료 개선에 관한연구

양인철 · 김진영

광운대학교 전자재료공학과
(1995년 2월 20일 접수)

A Study on the Improvement of Thin Film Interconnection Materials for Microelectronic Devices

I. C. Yang and J. Y. Kim

Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University
(Received February 20, 1995)

요 약 - 극소전자 디바이스의 고집적화에 의해 박막배선의 선폭은 $0.5 \mu\text{m}$ 이하로 축소되고 있고, 이에 따른 현재 배선 물질인 Al, Al-alloy의 electromigration에 대한 결함 발생 및 noble metal보다 상대적으로 낮은 전기전도도에 대한 개선책이 시급하다. 따라서 고전기전도도를 갖고 electromigration에 대한 저항력이 큰 새로운 박막배선 물질 개발이 필요하다. 본 연구에서는 이에 부응하여 고전기전도도 특성을 갖는 물질인 Ag, Cu, Au와 기존의 Al에 대하여 $100 \mu\text{m}$ 의 선폭과 0.5cm 의 길이를 갖는 박막 배선을 제작하여 d.c.인가와 분위기 온도에 따른 도체수명특성을 조사하고 이를 이용하여 활성화 에너지를 계산하여 극소전자 디바이스를 위해 박막 배선 물질이 갖는 electromigration에 대한 저항성을 제시한다. 각 물질은 5000\AA 의 두께를 갖는 SiO_2 층위에 500\AA 의 두께로 증착되었고 Ag, Cu박막배선에는 $2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$, Al과 Au박막배선에는 $6 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 의 전류밀도를 인가하였고 활성화 에너지를 구하기 위해 실온에서 240°C 까지의 분위기 온도에서 측정하였다. 활성화에너지는 Cu가 1.33 eV 로 가장 높게 나타났고 Au가 1.01 eV , Al이 0.71 eV , Ag가 0.30 eV 로 측정되었다. 따라서 Cu와 Au박막배선의 경우 electromigration에 대한 저항력이 강한 고활성화에너지 특성을 갖는 고전기전도도 재료로서 차세대 극소전자 디바이스를 위한 초고집적회로 박막배선 재료로서 제시된다.

Abstract - As the line width of a thin film interconnection in microelectronic devices is scaled down up to less than $0.5 \mu\text{m}$ by an ultra large scaled integration, the improvement of the electromigration failures and the relatively poor conductivity, compared to noble metals, in Al or Al-alloy which have been widely used for the present interconnection materials is necessary. Accordingly a new interconnection material with both strong resistance to the electromigration and high electrical conductivity is required. In this study, the electromigration resistance characteristics of Ag, Cu, Au and Al thin film interconnection materials with high conductivities have been investigated for microelectronic devices. Activation energies were calculated from the electromigration and lifetime test under an applied d.c. and ambient temperatures in the Ag, Cu, Au, Al thin film interconnections evaporated with the thickness of $0.05 \mu\text{m}$, the line width of $100 \mu\text{m}$, and the length of $5000 \mu\text{m}$. All thin films were deposited on to the thermally grown 5000\AA SiO_2 layer on p-Si(100). The current densities used in this study were $2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ for Ag and Cu, and $6 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ for Al and Cu, respectively. A room temperature to 240°C were used for measuring the activation energies for electromigration. Activation energy of Cu is 1.33 eV , which is the largest value. And the activation energies of Au, Al, Ag are 1.01 eV , 0.71 eV , 0.30 eV , respectively. Cu and Au can be suggested as a next thin film interconnection materials showing high activation energies, that is, strong resistance to the electromigration for ULSI.

1. 서 론

새로운 alloy의 개발은 기존 단일물질의 문제점들에 의해 응용되지 못했던 소자의 제작을 가능하게 하였고 사용 범위가 넓어지면서 이에 대한 중요성이 부각되고 있다. 그러나 순수단일물질의 특성은 그 연구에 대한 기본 바탕이 될 뿐만 아니라, 자체로서 소자에 적용될 수가 있다. 특히 본 연구에서 실험할 Ag, Cu, Al, Au는 주로 반도체 소자의 금속박막배선 및 contact, bonding에 사용되어지는 물질들로서 0.5 μm 이하의 박막배선폭을 요구하는 초고집적회로는 물론 고전기전도도를 이용한 자기저항소자 적층박막에 쓰이고 있고 특히, 최근에 증착방법에 따른 각 물질의 새로운 특성이 계속 발표되면서 다시 이 물질들에 대한 연구가 진행되고 있다[1, 2]. 따라서, 본 연구에서는 위에서 언급된 순수단일물질 박막배선에서의 electromigration에 따른 수명 및 그에 따른 각 물질의 활성화에너지를 측정하여 박막배선 물질이 가져야할 성질에 대해서 밝힌다.

Electromigration은 전도 전자와 'saddle point'에 위치한 금속 이온간의 운동량 교환으로 발생하며, 결과적으로 확산에 필요한 에너지를 금속 이온에 인가해줌으로써 기본적인 원자 점프를 유발하게 된다. 이때 원자 점프로부터 확산이 이루어지면서 물질이동이 생기고 이것은 박막배선 결합발생의 요인이 된다. 일반적으로 금속 도체내에서는 이온들간의 결합력과 반발정전력을 가진다. Potential well을 넘을 수 있는 에너지, 즉 활성화에너지를 얻을 경우 이온들은 격자로부터 독립됨으로써 인접한 vacancy를 따라 self-diffusion을 할 수 있다. 전류인가시, 결정에서의 운동량 교환에 따른 frictional force와 전자와 금속 이온간의 반응에 기인한 electrostatic force가 발생되는데 전자는 전류밀도에 비례하고 후자는 전계에 비례한다. 전자의 구속효과에 의해 frictional force는 항상 electrostatic force보다 크게된다. Frictional force의 발생에 의한 유도선속은 박막배선의 구조적 불균질성으로, 항상 같은 것은 아니다. 선속의 구배(divergence)는 고전류밀도하에서 일어나기 쉽고 구배가 크면, 전류흐름을 따르는 금속이온은 vacancy와의 위치교환확률이 높아지며 반대방향으로 흐르는 vacancy 역시 위치교환확률이 높아지게 된다. 금속이온의 표면돌출(surface extrusion)은 whisker를 형성하고 박막내부

에 존재하는 임계 vacancy 이상은 crack(or voids)을 유발한다. 결과적으로 voids의 형성은 전류응집현상을 가속화시키고 더불어 주열열을 발생시킴으로써 박막배선 결합발생의 원인이 되고, whisker는 다층박막배선에서 상, 하층 박막배선의 전기적 단락(electrical short)을 유도하여 소자수명에 영향을 미친다[3-5].

금속 박막배선에서 electromigration에 의한 결합발생은 전류인가와 그에 따른 온도 구배의 형성으로 인한 금속 이온들의 확산이 대표적 원인으로 작용한다. J. R. Black은 전류밀도 j , 물질상수 A , 확산에 필요한 활성화에너지 Q 를 이용하여 MTF(Mean-Time-to-Failure) = $Aj^{-n} \exp(-Q/kT)$ 를 정량화 하였다. n 은 전류 밀도에 관련된 상수로서 전류밀도와 주열열의 정도에 따라서 달라지고 일반적으로 $n=1\sim 3$ 사이를 취하며 본 실험에서는 2로 하였다[6-8]. 즉, 외부에서 인가한 전류밀도 j 와 온도 T , 활성화에너지 Q 에 의해 MTF가 결정되며 특히, 물질이 갖는 활성화에너지는 박막배선의 수명에 지배적이어서 이 값을 고유 특성화시킬 수 있다. 따라서 활성화에너지를 구함으로써 물질에 따른 박막배선의 수명변화를 예측할 수 있다. 활성화에너지가 클수록 electromigration에 대한 저항성은 커지고 Black의 방정식은 이를 설명해 준다. 물질의 활성화에너지가 크면 금속 이온들의 기본적인 원자 점프에 많은 에너지가 필요하므로 초기의 electrotransport에 의한 물질이동이 힘들어 결합발생 확률은 줄어들게 된다. 그러나 임계 활성화에너지 이상에서는 물질확산의 속도가 매우 빨라져 박막배선의 수명은 활성화에너지가 작은 물질보다 짧게됨을 알 수 있다. Electromigration에 대한 연구는 1961년에 H. B. Huntington 등에 의해 본격적으로 진행되어 박막 배선에서 결합발생의 주된 원인으로 해석되었고 [9], 1960년대말 J. R. Black에 의해 수명이 수식화 되었으며[6] 1970년대초에 R. E. Hummel 등은 이에 대한 각 물질들의 활성화에너지를 측정하여 electrotransport에 대한 특성을 정리하였다[10]. 1980년대에 들어서면서 grain size와 관련하여 확산 기구에 따른 해석이 활발하였고[11], 증착 및 분석기술이 발달한 최근에는 미세구조에 의한 영향까지 밝혀내고 있다 [12]. 지금까지 보고된 바에 의하면 박막 배선 물질은 일반적으로 높은 전기전도도를 가져야 하고 부착력과 열적 안정성이 좋아야 하며 electromigration에 대한 저항성이 강해야 한다[7, 13, 14]. Al, Al-alloy는 평균

적으로 이를 만족시킬 뿐만 아니라 공정상의 잇점 때문에 현재 가장 많이 사용되어지고 있다. 그러나 noble metal보다 상대적으로 낮은 전기전도도, 높은 resistivity와 electromigration에 의한 결함 발생은 좋은 부착력과 표면산화에 대한 강한 저항력에도 불구하고 항상 단점으로 제기되어 이를 극복하기 위한 개선책과 새로운 단일물질 개발에 대한 연구가 아울러 진행되어지고 있다.

따라서 본 연구에서는 이러한 단점들을 줄여줄 수 있는 물질인 Ag, Cu, Au 및 기존의 Al에 대해 electromigration 및 활성화에너지 측정을 통하여 각 물질들이 배선 재료로서 가지는 성질을 비교하고, 계속적인 고집적화에 따른 극소전자 디바이스의 박막배선이 가져야할 성질들 중 electromigration에 대한 강한 저항력, 즉 고활성화에너지 특성을 갖는 새로운 물질을 제시하고자 한다.

2. 실험 방법

Electromigration test 및 활성화에너지를 구하기 위한 시편은 Ag, Cu, Al, Au의 순수단일 물질을 thermal evaporator로 진공증착하였다. 증착중 진공도는 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ Torr, 증착률은 $1 \sim 5 \text{ \AA/s}$ 이었다. 마스크 패턴은 $100 \mu\text{m}$ 의 선폭과 $5000 \mu\text{m}$ 의 길이를 가지며, 측정시 probe와 증착 표면의 접촉 저항을 줄이기 위하여 접촉부를 크게 하였다. 기판은 열산화막 SiO_2 가 5000 \AA 입혀진 P형 (100) Si 웨이퍼를 사용하였다. mask와 기판은 초음파 세척기에서 증류수와 아세톤, 그리고 에틸 알코올을 사용하여 세척하였다. 증착된 물질들의 평균 두께는 500 \AA 이었고 이들 물질을 test 전, 후 광학 현미경과 SEM(Scanning Electron Microscopy)으로 관찰하였다. 가속화 실험을 위해 EM 측정용 박막배선의 두께는 500 \AA 으로 하였으며 초기 불량시편은 electromigration test 전 광학현미경 및 전기저항측정을 통해 제외시켰다.

Electromigration test 시 박막배선에 일정한 전류밀도를 인가해 주기 위한 전류원으로 Keithley 228 전압/전류원을 사용하였고 TTF(Time-to-Failure)와 박막배선에 나타나는 전압변화를 측정하기 위해 GPIB interface를 사용하였다. 인가되는 전류밀도는 Ag, Cu 박막배선에는 $2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ Al, Au 박막배선에는 $6 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 로 고정시켰다.

활성화에너지를 구하기 위해 hot plates를 사용하여 실온 뿐만 아니라 80°C 에서부터 240°C 까지 범위중 3개의 온도에서 각 물질의 시편에 대하여 electromigration test를 시행하였다. Al, Au, Ag, Cu 등 서로 다른 순수 단일 박막배선에서의 electromigration test는 가속화실험을 위해 비교적 높은 전류밀도하에서 실행되었으며, 조건은 결함발생시간의 현저한 차이로 인해 예비실험 후 상대적으로 짧은 결함발생시간을 보이는 Ag, Cu의 경우 $2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$, 긴 결함발생시간을 나타내는 Al, Au의 경우 $6 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 로 가속화 실험조건을 취하였다. 측정시편의 수는 각 물질마다, 각각의 온도에서 5개~10개로서 이중 중앙 3개의 결함발생시간을 취하여 평균결함 발생시간(MTF)을 구하였다. 활성화에너지는 평균수명(Mean-Time-to-Failure, t_{50})에 대해서 온도의 역수에 대한 $\ln(t_{50})$ 의 Arrhenius plot을 취하고 Black의 방정식을 이용하여 구하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1 (a), (b)는 Ag와 Cu 박막 배선에 $2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$, 그리고 그림 1 (c), (d)는 Au와 Al 박막배선에 $6 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ 전류밀도를 각각 인가했을 때 각 온도에서 electromigration test 후 시편의 수명, Time-to-Failure (TTF)에 대하여 결함발생 누적확률의 변화를 보여 주고 있다. 결함발생 누적확률 50%일때 각 시편에 대한 Mean-Time-to-Failure(MTF, t_{50})는 Ag 박막배선의 경우 실온, 80°C , 130°C 에서 각각 1366.8 min. $\pm \sigma$ (84.84 min.), 754.8 min. $\pm \sigma$ (90.60 min.), 72.6 min. $\pm \sigma$ (8.46 min.)으로 온도가 올라갈수록 MTF는 지수함수적으로 감소하였다. Cu 박막배선의 MTF는 100°C , 130°C , 160°C 에서 각각 802.8 min. $\pm \sigma$ (85.02 min.), 28.8 min. $\pm \sigma$ (3.58 min.), 2.6 min. $\pm \sigma$ (0.19 min.)으로 나타났다. 130°C 에서는 Ag 박막배선의 평균수명(MTF, t_{50})이 긴 것으로 나타났으나 저온으로 내려갈수록 Cu 박막배선의 평균수명(MTF, t_{50})이 더 길게 나타나는 경향을 보인다. 낮은 온도에서 Ag 박막배선보다 수명이 길었던 Cu 박막배선이 온도가 올라감에 따라 오히려 Ag 박막배선보다 더 짧아지며 저항변화폭이 크게 되는 결과는 그림 3 (a)의 활성화에너지로 설명이 될 수 있다. 즉, 원자점프에 의한 물질 이동에 많은 에너지 즉, 활성화에너지를 요구하는 Cu는 이 에너지 이상을

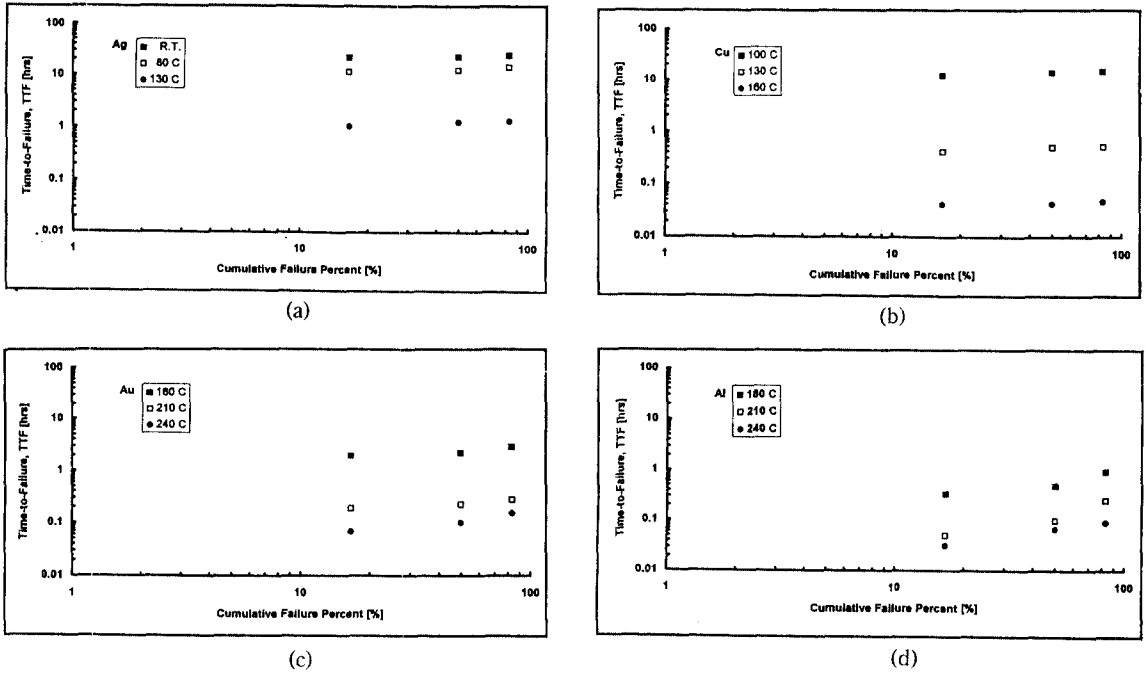


Fig. 1. (a) Time-to-Failure(TTF) vs. Cumulative Failure Percent(%) of Ag at R. T., 80°C and 130°C . ($j=2 \times 10^6$ A/cm²)
 (b) Time-to-Failure(TTF) vs. Cumulative Failure Percent(%) of Cu at 100°C, 130°C and 160°C . ($j=2 \times 10^6$ A/cm²)
 (c) Time-to-Failure(TTF) vs. Cumulative Failure Percent(%) of Au at 180°C, 210°C and 240°C . ($j=6 \times 10^6$ A/cm²)
 (d) Time-to-Failure(TTF) vs. Cumulative Failure Percent(%) of Al at 180°C, 210°C and 240°C . ($j=6 \times 10^6$ A/cm²)

발생되면 electrotransport에 의한 흐름이 더 커져서 결함발생이 빨리 나타나게 된다. Ag의 활성화에너지는 0.30 eV, Cu의 활성화에너지는 1.33 eV로 측정되었고 수명이 같아지는 온도는 약 117°C로 계산되었다. 이 값들을 근거로 하여 실온에서는 Cu박막배선의 electromigration에 대한 저항력이 Ag박막배선보다 대단히 커서 수명이 매우 길어질 것으로 판단된다. Au와 Al 박막배선의 경우 평균수명(MTF, t_{50})은 Ag 및 Cu 박막배선보다 훨씬 더 길게 나타났으며 가속화실험을 위해 더 큰 전류밀도, 즉 6×10^6 A/cm²와 더 높은 측정온도 즉 180°C에서 240°C 범위를 적용하여 MTF를 구하였다. Au와 Al 박막배선의 경우 MTF는 측정온도 180°C에서 각각 132.6 min. $\pm \sigma(30.54$ min.)과 34.8 min. $\pm \sigma(21.06$ min.), 측정온도 210°C에서 각각 13.3 min. $\pm \sigma(3.06$ min.)과 7.8 min. $\pm \sigma(7.08$ min.), 그리고 측정온도 240°C에서 각각 6.4 min. $\pm \sigma(2.82$

min.)과 4.2 min. $\pm \sigma(1.82$ min.)으로 Au 박막배선 이전 온도 범위에서 Al 박막배선보다 평균수명(MTF, t_{50})이 더 길게 나타났다. electromigration test에 적용된 온도범위가 실온에서 240°C까지로서 electromigration 현상은 bulk diffusion보다는 grain-boundary diffusion에 의해 electrotransport가 주도되었으리라 판단된다[12]. 또한 Ag, Cu, Au, Al의 모든 박막배선에서 온도가 증가할수록 평균수명(MTF, t_{50})이 지수함수적으로 감소하는 것은 diffusion process에 의한 mass transport mechanism에 기인하는 것으로 사료된다. 또한 온도가 올라감에 따라 저항변화가 급격히 진행되었고 동시에 line에 대하여 결함발생의 위치가 실온 상태에 비하여 불규칙하게됨을 알 수 있었다. 이것은 열에 의해 구조적인 불균일성을 갖는 박막 전도체의 물질 흐름이 국부적으로 강하게 일어나서 coulombic force가 미친 영향이 상대적으로 작아지게

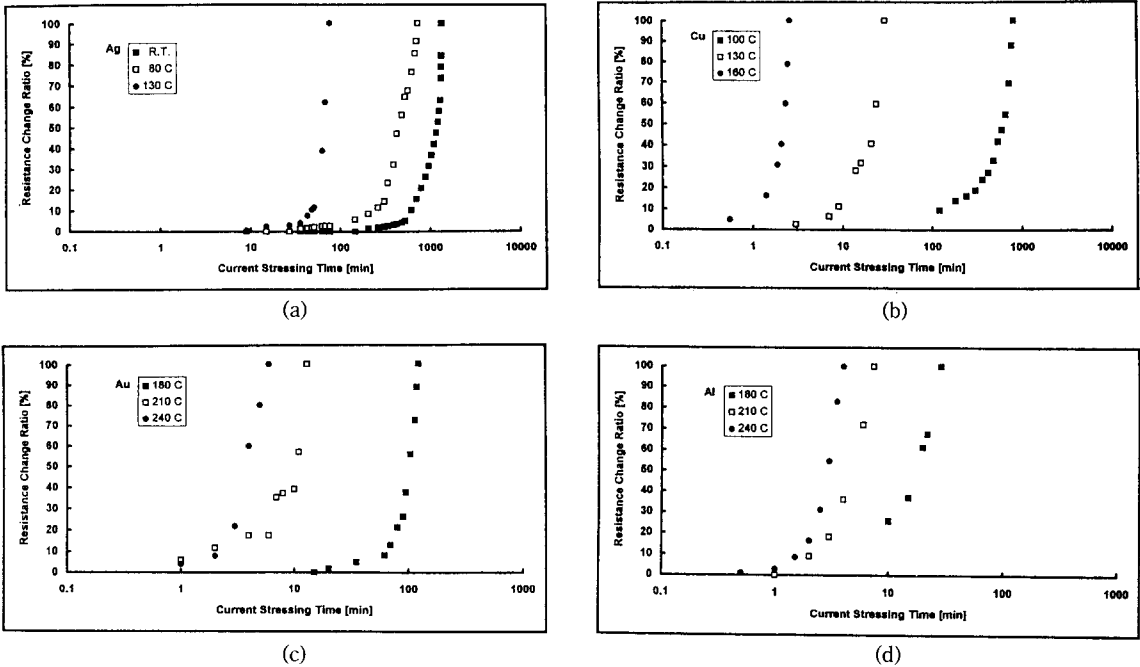


Fig. 2. (a) Resistance Change Ratio(%) vs. Current Stressing Time(min.) of Ag at R. T., 80°C and 130°C . ($j=2 \times 10^6$ A/cm²)
 (b) Resistance Change Ratio(%) vs. Current Stressing Time (min.) of Cu at 100°C , 130°C and 160°C . ($j=2 \times 10^6$ A/cm²)
 (c) Resistance Change Ratio(%) vs. Current Stressing Time (min.) of Au at 180°C , 210°C and 240°C . ($j=6 \times 10^6$ A/cm²)
 (d) Resistance Change Ratio(%) vs. Current Stressing Time (min.) of Al at 180°C , 210°C and 240°C . ($j=6 \times 10^6$ A/cm²)

된 것으로 사료된다.

그림 2 (a), (b), (c), (d)는 각각 Ag, Cu, Au, Al 박막배선에서의 d.c.인가에 따른 저항변화비를 보여 준다. Time-to-Failure(TTF)는 d.c.인가시 저항변화를 기록하여 전기적 개방(electrical open)까지의 시간으로 하였다. 측정온도가 증가함에 따라 TTF는 Ag, Cu, Au, Al등 모든 박막배선에서 감소하며 저항변화도 급격히 진행됨을 알 수 있다.

그림 3 (a)와 (b)는 각각 Ag, Cu, Au, Al 박막배선에서의 온도의 역수에 대한 평균수명(MTF)의 변화로서 직선의 기울기를 측정하여 Black의 실험식, MTF(t_{50})= $Aj^{-n} \exp(-Q/kT)$,으로부터 각 박막배선의 electromigration(EM)에 대한 activation energy(활성화에너지)를 구하였다. Ag, Cu, Au, Al 박막배선의 평균수명(MTF) 및 신뢰도(σ)를 Table 1에 나타내었고, 또한 활성화에너지(activation energy, Q) 값을 전기

Table 1. Mean-Time-to-Failure(MTF, t_{50}) of Ag, Cu, Au and Al Thin Film Interconnections

Materials	Current		MTF(min.)	σ (min.)
	Densities (A/cm ²)	Temp.(°C)		
Ag	2×10^6	R.T.	1366.8	84.84
		80	754.8	90.60
		130	72.6	8.46
Cu	2×10^6	100	802.8	85.02
		130	28.8	3.58
		160	2.6	0.19
Au	6×10^6	180	132.6	30.54
		210	13.3	3.06
		240	6.4	2.82
Al	6×10^6	180	34.8	21.06
		210	7.8	7.08
		240	4.2	1.82

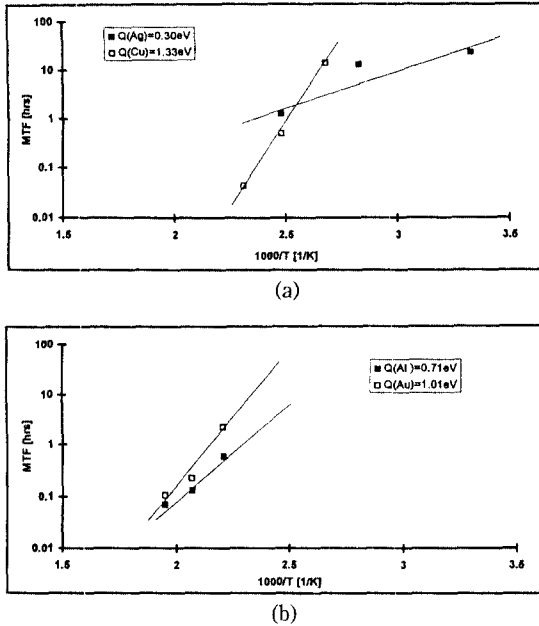


Fig. 3. (a) Activation Energy, Q, of Ag and Cu Calculated from $MTF = A_j \exp(-Q/KT)$
 (b) Activation Energy, Q, of Au and Al Calculated from $MTF = A_j \exp(-Q/KT)$

Table 2. Electrical Conductivities, Melting Temperatures, and Activation Energies of Ag, Cu, Au, and Al Thin Film Materials

Materials	Properties	Electrical Conductivity (ohm-cm) ⁻¹	Melting Temp. (°C)	Activation Energy (eV)
Ag		6.21×10^5	961	0.30
Cu		5.88×10^5	1083	1.33
Au		4.55×10^5	1063	1.01
Al		3.65×10^5	660	0.71

전도도 및 용융점과 함께 Table 2[15, 16]에 정리하였다. Electromigration에 대한 활성화에너지 값이 크게 나타난 Cu 박막배선이 Al보다 결함발생시간이 짧은 것은 Cu 박막배선의 표면산화 등 외부요인에 의한 영향으로 사료되며 본 논문에서는 고전기전도도를 갖는 Ag, Cu, Au, Al 등 순수단일박막의 경우로서 산화보호막 효과 등 외부요인이 활성화에너지에 미치는 영향이 계속 연구되어야 하겠다. 본 실험에서 측정된 Ag, Cu, Au, Al 박막배선의 초기전도도는 3.1×10^5 , 2.3×10^5 , 1.1×10^5 , 0.8×10^6 [ohm-cm]⁻¹ 로써

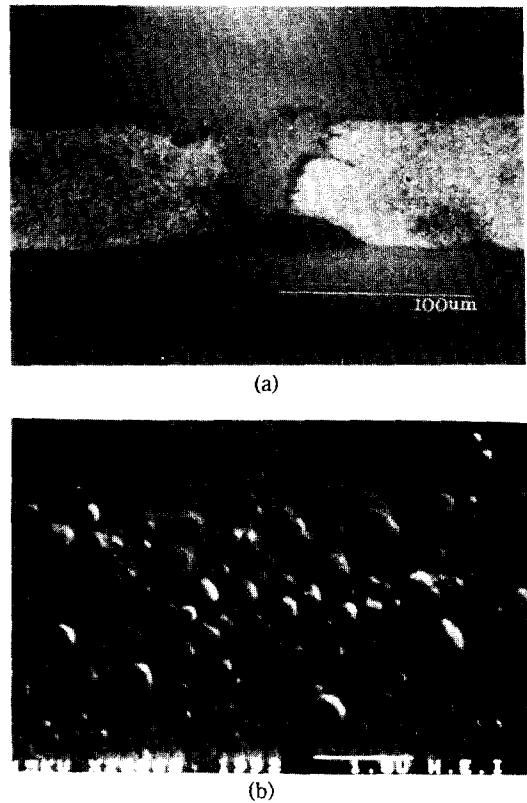


Fig. 4. Micrographs of Electromigration Induced Failure in (a) Ag (voids), (b) Cu(hillocks) Thin Films after d.c. Stressing

Table 1의 전기전도도 값보다 낮았으며 이는 박막형성 과정에서 생성된 결함 등에 기인하는 것으로 사료된다. Electromigration(EM)에 대한 활성화에너지(activation energy, Q)는 Cu 박막배선에서 1.33 eV로써 가장 높게 나타났고, Au 박막배선에서 1.01, 그리고 Al 박막배선에서 0.71 eV이었으며 전기전도도가 가장 높은 Ag 박막배선의 경우 0.30 eV로써 가장 낮은 활성화에너지 값을 보였다. J. Tao 등은 electromigration에 대한 활성화에너지 값이 Al-alloy에 비해 Cu 박막배선에서 크게 나타났음을 발표한 바 있다. 이와 같이 Cu와 Au 박막배선의 electromigration에 대한 저항력이 Ag, Al 박막배선보다 강할 것으로 사료된다. 따라서 Cu와 Au 박막배선의 경우 Al보다 높은 전기전도도를 갖는 재료로서 electromigration에 대한 저항력이 강한 고활성화에너지 특성을 보여 차세대 극소전자 디바이스를 위한 대체 박막배선재료로서의

가능성을 보인다. 그림 4는 광학현미경 및 주사전자 현미경 사진으로써 Ag, Cu 등 박막배선에서의 d.c. 인가 후 electromigration에 의해 발생한 void와 hillock 등 결함의 모습을 보여준다.

4. 결 론

고전기전도도 물질인 Ag, Cu, Au, Al박막배선에 대해 electromigration에 대한 활성화에너지를 측정된 결과 Cu박막배선에서 1.33 eV로 가장 큰 값으로 나타났으며 Au는 1.01 eV, Al은 0.71 eV, Ag는 0.30 eV의 값으로 측정되었다. Cu 및 Au의 경우 Al보다 전기 전도도가 더 좋고 또한 eletromigration에 대한 저항성, 즉 활성화에너지가 더 높은 것으로 나타나 차세대 극소전자 디바이스를 위한 대체 박막배선재료로서의 가능성을 보인다.

감사의 글

본 연구는 1994년도 한국과학재단 핵심전문연구과제에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Peter M. Levy and Shufeng Zhang, *Phys.Rev.Lett.*, **65**, 1643 (1990).
- Alain E. Kaloyeros and Michael A. Fury, *MRS Bulletin*, **22** (1993).
- R. Vanselow etc., *Appl. Phys. Lett.*, **12**, 341 (1975).
- B. Selikon, *Proc. IEEE*, **57**, 1594 (1969).
- I. A. Blech and C. Herring, *Appl. Phys. Lett.*, **29**, 131 (1976).
- J. R. Black, *IEEE Trans.Electron.Devices*, **ED-16**, 338 (1969).
- Janet M. Towner, *IRPS*, 81 (1985).
- J. Chern etc., *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-31**, 1256 (1986).
- H. B. Huntinton and A. R. Grone, *J. Phys. Chem. Solids*, **20**, 76 (1961).
- Rolf. E. Hummel and H. J. Geier, *Thin Solid Films*, **25**, 335 (1975).
- J. Cho and C. V. Thomson, *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 2577 (1989).
- M. L. Dreyer etc., *IRPS*, **31**, 304 (1993).
- Harry A. Schafft and Tammy C. Grant, *IRPS*, 93 (1985).
- I. Ames, *IBM J. Res. Devices*, **14**, 461 (1970).
- Charles Kittel, *Introduction to Solid State Phys.*, 6th ed., 144 (1986).
- Rolf. E. Hummel, *Electronic Properties of Materials*, 2nd ed., 379 (1992).
- J. Tao and N. Cheung, *IEEE Electron Device Lett.*, **14**(5), 249 (1993).
- Peter M. Levy and Shufeng Zhang, *Phys.Rev.Lett.*,