

Electromigration 고장에 의한 Amplifier IC의 수명 예측

이호영[†] · 장미순* · 곽계달**

Lifetime Estimation of Amplifier IC due to Electromigration failure

Ho-Young Lee, Mi-Soon Chang and Kae-Dal Kwack

Key Words: Electromigration(전자이주), Failure Analysis(고장분석), Void(공핍), Hillock(누적), Current density(전류밀도), Joule heating(줄열)

Abstract

Electromigration is a one of a critical failure mechanism in microelectronic devices. Minimizing the thin film interconnections in microelectronic devices make high current densities at electrical line. Under high current densities, an electromigration becomes critical problems in a microelectronic device. This phenomena under DC conditions was investigated with high temperature. The current density of 1.5MA/cm² was stressed in interconnections under DC condition, and temperature condition 150°C, 175°C, 200°C. By increasing of thin film interconnections, microelectronic devices durability is decreased and it gets more restriction by temperature. Electromigration makes electronic open by void induced, and hillock induced makes electronic short state.

1. 서론

현대사회에 들어와서 VLSI 소자의 집적화가 더욱 심화됨에 따라 집적회로 내에서의 복잡성이 증가되었다. 필연적으로 집적회로내의 금속배선의 선평의 축소가 요구되었고 이로 인해 소자의 동작 시 고정된 전류조건 내에서 단위면적당 요구되는 전류밀도의 양이 증가하게 되었다. 이로 인해 알루미늄 배선은 필연적으로 몇 가지 문제점을 들어내게 되었는데 그 중 한가지는 높은 저항률에 따른 RC 지연과, electromigration에 의해 고장이 발생하는 것이다.⁽¹⁾

Electromigration은 금속 배선내 전자의 흐름에 의해서 발생하는 운동량의 전이에 의해 금속

원자가 임계치 이상의 에너지를 얻게 되어 금속 배선에서 떨어져 나와 배선이 끊어지거나 단락되는 현상이다. 이러한 electromigration 현상은 상온에서도 끊임없이 발생하지만 전류밀도가 상승하고, 온도가 높은 조건에서는 joule heating과 금속 원자의 확산계수의 증가로 인해 더욱 심해지며 최근에 와서 electromigration 현상은 박막배선에 직접적인 영향을 줌으로써 소자의 고장에 주요 요인으로 작용하고 있다. 이를 극복하기 위한 연구로 저항률이 낮으며, electromigration에 강한 저항성을 보이는 MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 방법을 통한 Cu 합금연구가 활발히 진행되고 있다.⁽²⁾

Electromigration 현상은 Gerardin에 의해 처음으로 발견되었으며⁽³⁾ 이 현상이 관심 받게 된 건 1966년 집적회로가 상업적으로 사용되면서부터이며 James R.Black에 의해 최초로 이 electromigration 현상이 반도체 소자의 전기적 open을 유도한다고 발표되었다.⁽⁴⁾ 하지만 그 당시의 반도체 소자의 폭은 10um 였다. 그러나 현대 사회에

[†] 이호영, 한양대학교, 전자통신컴퓨터공학부
전화번호 : 010-3062-3120
이 메 일 : dazers62@hanmail.net

* 한양대학교 신뢰성분석연구센터(RARC)

** 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부

와서는 반도체소자폭이 100nm부터 10nm에 이르기까지 그 당시보다 집적도는 비약적으로 상승했으며, 이로 인해 전류밀도가 상승하면서 electromigration이 반도체 IC에 더욱 심각한 영향을 미치게 되었다.⁽⁵⁾

요즘 반도체 IC는 controlled collapse chip connection 로 알려진 flip chip 구조가 많이 사용되며, 이 방식은 칩의 멀티레벨을 solder bump로 연결하는 구조이기 때문에 이 solder bump에서 발생하는 electromigration에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 그러나 solder bump에서 발생하는 electromigration은 주로 IC내의 멀티레벨간의 연결 부위에 발생하기 때문에 본 연구에서는 금속화된 배선내의 electromigration 발생을 살펴보기 위해 일반 audio amplifier에서 사용되는 IC 소자를 사용하여 시험을 실시하였다. 또한 회로안의 electromigration 현상에 직접적인 영향을 주는 전류밀도와 온도와의 관계를 고려하면서, 온도에 따른 electromigration에 의한 고장을 분석하고 수명을 예측해 보고자 하였다.

2. Electromigration에 의한 고장 메커니즘

2.1 Electromigration 현상

일반적으로 electromigration 현상은 Fig. 1에서 나타낸 것과 같이 일정량 이상의 전류밀도를 가진 전류가 금속화된 배선을 흐를 때 발생하게 된다. 일반적으로 10^4 A/cm^2 이상의 전류밀도를 가진 전류가 흐르는 금속배선내의 원자는 캐리어로 전자를 갖게 되는데, 원자는 cathode에서 anode로 이동한다. 이러한 원자의 이동은 금속선내의 전자가 흐를 때 생기는 충돌에 의해 발생하는 운동 에너지의 전이에 의해 발생하게 된다. 이러한 충돌은 금속배선내의 전자가 흐르는 방향과 동일한 방향으로 움직이며 이러한 원자의 이동으로 인해 Fig. 2에서 나타난 것과 같이 한곳에서는 원자들이 쌓이게 되어 hillock이 발생하게 되며 다른 한 곳에서는 빠져나간 원자들 때문에 전기적으로 open이 발생하는 void 현상이 일어나게 된다. 이로 인해 야기되는 고장현상을 electromigration 이라고 한다. 최근 연구에 따르면 IC내에서의 전류 밀도가 10^4 A/cm^2 이상으로 도달했을 때, 음극에서는 금속원자의 IC내로의 유입과 함께 금속원자

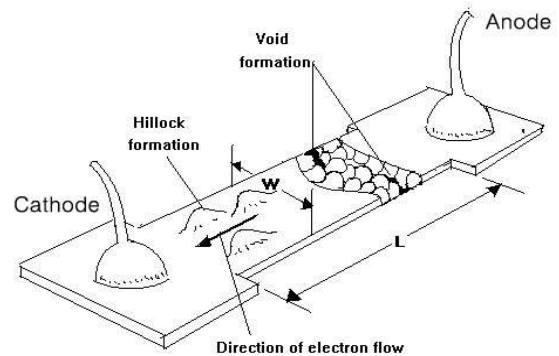


Fig. 1 Electromigration Mechanism

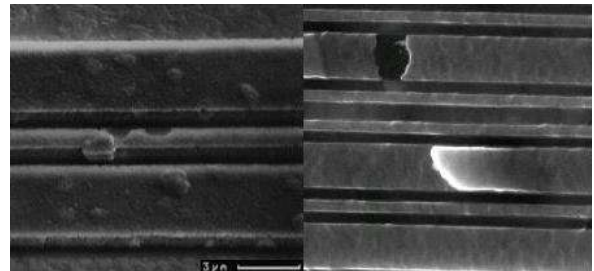


Fig. 2 Electromigration on interconnection

들의 심각한 이동이 관찰되었으며 음극에서는 micro void의 발생과, 양극에서의 hillock이 발생되어 박막배선의 고장이 발생된다고 보고되었다.⁽⁶⁾

2.2 Electromigration 고장 메커니즘

Electromigration 고장 메커니즘에 대해 좀 더 자세히 설명해 보면, 전류의 흐름에 의해 전자들이 전류의 반대방향으로 이동하면서 전자들의 운동량이 금속원자에 전이된다. 이 운동량에 의해 금속원자들이 받는 힘이 금속원자가 이동하기 위한 에너지의 임계치를 넘어서게 되면 금속원자들은 전자가 흐르는 방향으로 흘러가게 된다. 이 금속원자들은 Fig. 3에서와 같이 자신들이 떨어져 나온 금속의 grain boundary를 따라서 이동하게 되어 두 개 이상의 경계면들이 하나로 합쳐지거나 하나의 경계면이 두 개 이상의 경계면들로 나뉘어질 때, 전자의 경우는 금속원자가 쌓이게 되며, 후자의 경우는 금속원자의 이탈이 발생된다. 금속원자가 쌓이는 영역에서는 hillock이 발생하여 박막배선 내에서의 단락현상이 발생하게 되고, 금속원자가 IC내로의 유입이 되는 영역에서는 void가 발생하여 박막배선 내에서 개방된 상

태가 나타나게 된다. 이 현상은 전류밀도가 높을수록 단위면적당 흐르는 전자의 양이 증가하기 때문에 금속원자에 가해지는 운동에너지가 커지게 되어 고장발생의 가속요인이 된다. 또한 온도가 상승할수록 금속원자의 확산계수가 커지기 때문에 electromigration에 의한 고장은 더욱더 가속화 되어 발생하게 된다. 또한 전류에 의해 생기는 열량 Q 는 전류의세기 I 의 제곱과, 도체의 전기저항 R , 전류를 통한 시간 t 에 비례 한다는 법칙($Q = 0.24I^2 \cdot R \cdot t$)인 joule heating에 의해 반도체 IC에 가해지는 전류에 의해 받는 열량 즉, 온도가 더욱 높아지게 하는 작용을 하게 된다. 이것으로 인해 금속원자의 확산도가 높아지게 되어 결국 electromigration의 발생을 더욱 가속화 시키는 요인이 된다. 따라서 electromigration에 대한 고장모드와 메커니즘을 FTA(Fault Tree Analysis)를 활용하여 Fig. 4 에 나타냈다.

3. Electromigration의 가속수명시험

3.1 시료선정 및 고장판단기준

시료는 고장이 발생될시 문제가 생긴 배선의 위치를 비교적 발견하기 쉬운 간단한 구조의 T사의 15W Audio Amplifier IC를 선택 하였으며 초기 평균저항이 0280Ω으로 측정되었고, 2μm의 두께와 0.2μm의 높이를 가진 금속화된 배선의 특징을 갖고 있다. 고장 판단 기준은 시료의 동작전압이 1V~10V인 것과 동작을 위한 최소한의 대기전류(I_q) 수치가 23mA 인 것을 고려하여 IC내의

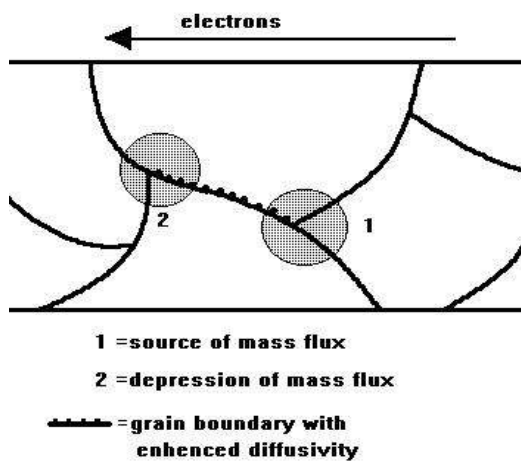


Fig. 3 Grain boundary

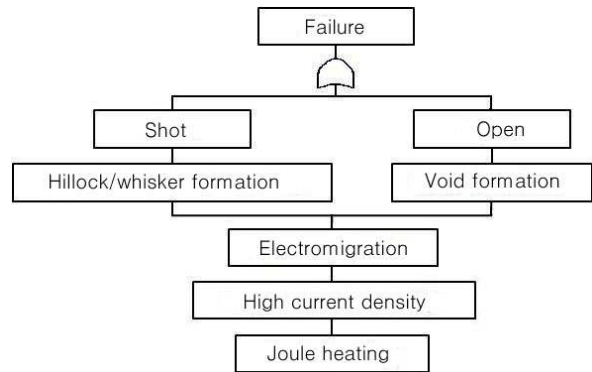


Fig. 4 Failure mode/mechanism of electromigration using FTA

저항이 1.5kΩ 이상 일 때로 선정하였다.

3.2 시험 장치 및 방법

본 연구에서는 DC Power Supply를 활용하여 반도체 IC에 1.5MA/cm² 전류밀도를 가해 주기 위해 저항 510Ω을 연결하여 3.0V의 전압을 걸어주었다. 연결선은 내열선을 활용해 고온에서도 전류를 안정성 있게 전류를 흘려 보내 일정한 전류 밀도를 유지할 수 있도록 하였다. Electromigration의 고온 가속환경을 만들어주기 위해 시료들을 오븐에서 시험을 실시하였다.

반도체 IC내에서의 Electromigration의 발생을 관찰하고 가속인자인 온도에 따른 수명변화를 살펴보기 위해 Table 1과 같이 각 조건마다 10개의 시료를 1.5MA/cm²의 전류밀도를 인가시키고 가속 인자로 온도를 선택하여 각각 150℃, 175℃, 200℃의 고온을 가해주었다.

3.2.1 측정방법

고장을 판단하기 위한 저항 측정방식은 시험 중 일주일(168h)을 주기로 멀티미터를 활용하여 저항을 측정하였으며 고장으로 판단 된 시료는 주사 전자 현미경(Scanning Electron Microscope,

Table 1 Test matrix

	Temperature	Current	No. of Sample
1	150℃	1.5MA/cm ²	10 ea
2	175℃	1.5MA/cm ²	10 ea
3	200℃	1.5MA/cm ²	10 ea

SEM)을 통해 관찰 하였다.

3.3 시험결과

3.3.1 시험의 관측 결과

가속수명시험에서 고장이 발생한 시료에 대한 고장분석을 실시한 결과 IC내의 집적소자간의 배선에 대한 저항이 1~3MΩ 까지 발생하며 이를 통해 발생된 주요 고장은 void에 의한 단선(open)인 것을 확인할 수 있었다. 또한 고장시간을 Table 2에 각 조건별로 나타냈었다.

3.3.2 수명분포의 적합성 검토 및 가속성 검토

가속수명시험을 통하여 수집된 데이터에 적합한 수명분포를 활용하기 위하여 와이블, 지수, 대수정규분포의 우도함수(likelihood function)값을 비교하여 Table 3에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 우도함수 값이 가장 큰 와이블 분포가 수명분포에 가장 적합하다는 것을 알 수 있었다.

가속수명시험에서 보여진 고장시간을 시험조건별로 와이블 확률용지에 타점하여 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 각 시험조건별 데이터들이 지선에 가깝게 배치되어 있고 각 시험조건의 수명분포 추정선이 서로 평행에 가깝게 나타난 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 와이블 분포가

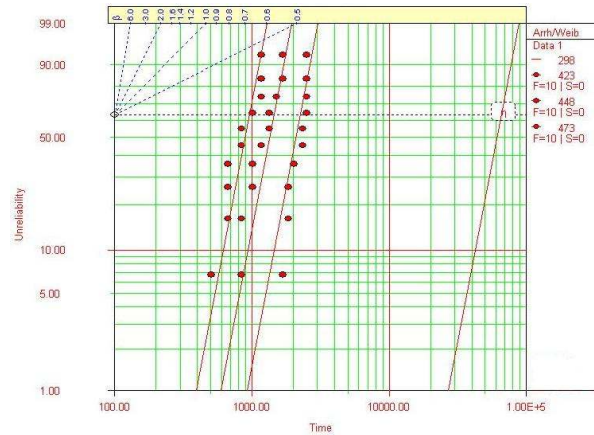


Fig. 5 Weibull probability paper plot

적합하고, 시험조건 사이에 가속성이 성립한다는 것을 알 수 있다. (5)

3.3.3 가속수명시험 모델

Amplifier IC의 수명은 가속인자인 온도에 따른 가속수명 추정 모델로 온도 스트레스 수명시험에서 가장 널리 사용되는 Arrhenius모델로 가정하고 특성수명(η), 온도 사이의 관계식을 아래식 (1)과 같은 관계식으로 나타내었다.

$$\eta(T) = C \cdot e^{\frac{B}{T}} \tag{1}$$

여기서 T는 각 스트레스에 대한 절대온도이며 C는 재료, 구조 및 시험방법 등에 의한 상수이고 B는 활성화 에너지를 볼츠만상수K(8.617385×10⁻⁵ eV·K⁻¹)로 나눈 값이다.

3.3.4 와이블형상모수와 수명-스트레스 관계식

와이블 분포와 식(1)의 수명-스트레스 관계식을 가정하고, ALTA소프트웨어를 이용하여 가속수명시험으로 얻어진 데이터를 분석한 결과는 다음과 같다.

$$\beta=5.1536 \quad B=3406.9479 \quad C=0.7175$$

따라서, Amplifier IC의 가속수명시험에 의한 수명-스트레스 관계식은 아래의 식 (2)와 같고 가속계수 및 B₁₀ 수명식은 각각 식 (3)과 식 (4)와 같이 추정될 수 있다.(5)

$$\eta(T) = 0.7175 \cdot e^{\frac{3406.9478}{T}} \tag{2}$$

Table 2 Failure lifetime of IC [unit : hours]

Temperature	150℃	175℃	200℃
#1	1,680	840	504
#2	1,848	840	672
#3	1,848	1,008	672
#4	2,016	1,008	672
#5	2,352	1,176	840
#6	2,352	1,344	840
#7	2,520	1,344	1,008
#8	2,520	1,512	1,176
#9	2,520	1,680	1,176
#10	2,520	1,680	1,176

Table 3 Conformance result of life distribution

Distribution	Weibull	Exponential	Lognormal
Likelihood-Function	-213.7244	-246.0474	-214.6008

$$A_F = \frac{C e^{\frac{B}{T_u}}}{C e^{\frac{B}{T_a}}} = e^{\left(\frac{3406.9479}{T_y} - \frac{3406.9479}{T_A} \right)} \quad (3)$$

$$B_{10} = \eta \cdot (-\ln(0.9)) \frac{1}{5.1536} \quad (4)$$

3.4 시험 결과의 해석

Amplifier IC의 온도에 대한 수명-스트레스 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 온도에 따른 IC의 수명분포가 상한선과 하한선에 잘 분포하는 것을 알 수 있었다. 온도에 대한 가속계수의 변화는 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 온도가 증가할수록 가속계수의 값은 지수함수적인 형태로 증가하는 것을 알 수 있으며, 이는 온도가 증가할수록 IC에 끼치는 영향이 더욱 커짐을 알 수 있다. 또한 이것은 온도가 고온으로 갈수록 고장이 발생하는데 걸리는 시간이 짧아진다는 것을 의미하며 이는 상온에서 고온으로 이르는 구간에 걸쳐서 고장메커니즘이 변하지 않는 범위 내에서 적용될 수 있다.

온도에 따른 B_{10} 수명의 변화는 Fig. 8에 나타내었다. 온도에 따른 B_{10} 수명의 변화를 살펴보면 온도가 증가할수록 B_{10} 수명은 지수 함수적으로 감소하는 것을 알 수 있으며, 상온(25℃) 일 때, 약 42,912시간(1,788일)의 수명을 갖는 것으로 예측되었다. 사용환경이 30℃와 60℃의 경우를 비교해보면 온도는 2배로 늘었지만 B_{10} 수명은 각각 35,434시간, 12,867시간으로 약 1/3로 줄어드는 것으로 보아 증가하는 온도수치에 비해 B_{10} 수명은 더욱 빠른 속도로 줄어드는 것을 알 수 있었다. 이는 일반적인 IC의 사용환경을 고려해볼 때, 최대한 낮은 온도에서 사용하면 더욱 고장률의 증가폭을 크게 낮추 수 있음을 제시해 준다.

4. 결론

본 연구에서는 반도체 IC내 배선의 금속화와 회로의 집적화로 인해 발생하는 electromigration에 대한 가속시험을 다루었다. 온도를 가속 인자로 정하여 가속열화시험을 실시하였으며 이를 통해 고장메커니즘을 재현할 수 있었다. 시험에서 발생한 주요 고장요인은 void에 의한 단선(open)인

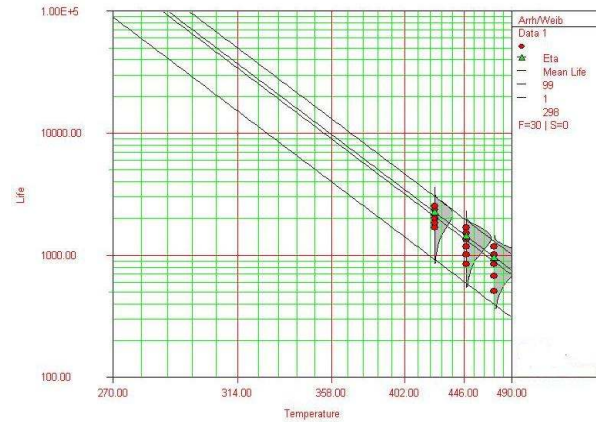


Fig. 6 Life vs. Stress

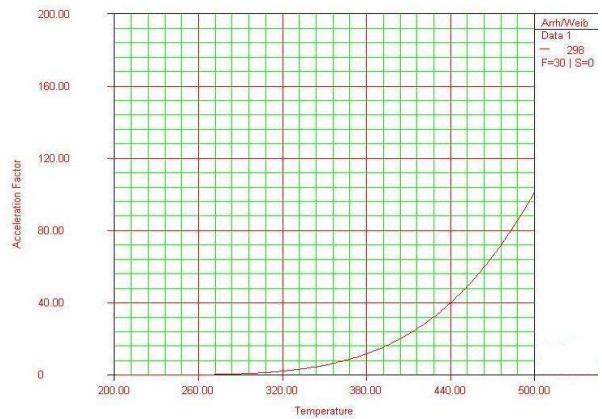


Fig. 7 AF vs. Stress

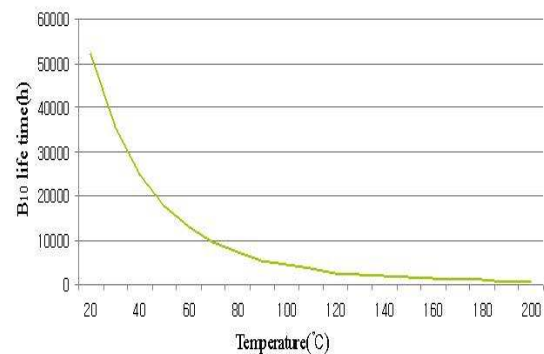


Fig. 8 B_{10} Life vs. Stress

것으로 나타났으며 또한 이를 통해 B_{10} 수명의 추정 결과 상온(25℃) 일 때 약 1,788일의 수명을 갖는 것을 산출해낼 수 있었다.

참고문헌

- (1) C. V. Thompson and J. R Lloyd, 1993, "Electromigration and IC Interconnects," *MRS BULLETIN-MATERIALS RESEARCH SOCIETY*, Mater. Res. Bull. 18, 19
- (2) J. Tao, N. W. Cheung, C. Hu, 1993, "Electromigration characteristics of copper interconnects," *IEEE Electron Device*, Lett. 14, pp. 240
- (3) Milton Ohring, 1991, "The Materials Science of Thin Films," *Academic Press, Inc* Vol. 9, p. 379.
- (4) James R. Black, 1969, "Electromigration Failure Modes in Aluminum Metallization for Semiconductor Devices," *IEEE. Trans. Electronic Device* Vol. ED-16(4), pp. 338
- (5) ReliaSoft Corporation-Tucson, 2002, "Modeling and Analysis of Timedependent Stress Accelerated Life data," *Proceeding Annual Reliability and Maintainability Symposium*, pp. 343~348
- (6) Jeong-Won Yoon, Jong-Woong Kim, Ja-Myeong Koo, Sang-Su Ha, Bo-In Noh, Won-Chul Moon, Jeong-Hoon Moon and Seung-Boo Jung, 2007, "Flip-chip Bonding Technology and Reliability of Electronic Packaging,,", *Journal of KWJS*, Vol. 25, pp. 6~15
- (7) Gary S. May , Simon M. Sze, 2004, "Fundamentals of Semiconductor Fabrication," Wiley, p190~191
- (8) James W. Harrison, JR, "A Simulation Model for Electromigration in Fineline Metallization of Integrated Circuits Due to Repetitive Pulsed Currents," *IEEE. Trans. Electronic Device*, Vol. 35 No.12
- (9) J.R Lloyd, 1999, "Electromigration in Intergrated circuit conductors," *Journal of physics-London-D applied physics*, Vol 32, R 109 - R118