

# Pulsed DC 조건에서 반도체 배선의 electromigration 시뮬레이션 : 주파수, duty factor, 온도효과

## Simulation of electromigration behavior on ULSI's interconnect under pulsed DC stress : frequency, duty factor, temperature effect

이동현\*, 안진호\*\*, 박영준\*

(Dong-Hyun Lee, Jin-Ho An, and Young-Joon Park)

### Abstract

Electromigration is atomic diffusion driven by a momentum transfer from conducting electrons. With every new generation of intergrated circuits, interconnect line widths have been reduced and current densities in the interconnect have become higher. This leads to an increase in the threat to interconnect reliability due to electromigration. In this paper, we simulated stress evolution with changing temperature, duty factor(ratio of on time and pulse time), frequency under pulsed DC condition. As a result, we predict MTF(median time to failure) and found that exponent n is affected by changing temperature, duty factor.

**Key Words** : Electromigration; Pulsed-DC stress; median time to failure; simulation; duty factor

### 1. 서 론

반도체의 회로가 초고집적화 되면서 배선의 폭은 줄어들어는 반면 흐르는 전류는 유지되거나 증가하게 되어 electromigration의 신뢰성 문제가 심각하게 되고 있다[1-2]. 실제 배선에 흐르는 전류의 파형은 DC(direct current), pulsed DC등의 파형으로 존재하게 되는데, 반도체 회로에 흐르는 전류에 의한 electromigration은 pulsed DC에 의하여 일어나는 경우가 많다[3]. 이러한 pulsed DC의 경우에는 배선의 수명은 on-time 동안에 흐른 전류의 joule heating에 의한 off-time 동안의 온도변화, 전류밀도, duty factor등의 요소에 의한 영향을 받는다[4]. Pulsed DC에서 배선의 수명은 DC 조건에서 배선

의 파손 시간을 예측한 Black의 식을 실험으로부터 일반화시킨 식(1)으로부터 예측할 수 있다[5-8].

$$MTF = A j^{-n} r^{-m} \exp(E_a/kT) \quad (1)$$

여기서 MTF는 median time to failure로 배선의 평균적인 수명을 나타내고, A는 물질 상수,  $E_a$ 는 활성화 에너지, j는 전류밀도, n은 MTF의 전류밀도 의존성, r은 펄스 폭과 휴지 시간의 비율인 duty factor, m은 MTF의 duty factor 의존성을 의미한다. m값은 pulse DC에서 전류가 흐를 때 배선 수명 큰 영향을 미치는 요소로 작용하는데 m값을 1로 가정하는 on-time 모델과 m값을 2로 가정하는 average current density 모델이 있다[9,10]. 본 연구에서는 두 모델에서 가정하는 m값을 off-time 동안의 온도를 변화시키며 확인해 볼 수 있었고, 컴퓨터 모사를 통하여 pulsed DC조건에서 off-time동안의 온도 변화에 따라 주파수, 전류밀도, duty factor를 변화시키면서 배선의 위치에 따

\*: 한국과학기술연구원 나노소자 연구센터  
(서울시 성북구 상월곡동 39-1, Fax: 02-958-6851  
E-mail : yj-park@kist.re.kr)

\*\* : 한양대학교 재료공학과

른 응력변화와 시간이 변화하면서 발생하는 배선의 최대 응력 값을 구할 수 있었다. 또한 각각의 요소가 배선의 응력 발생에 미치는 영향을 알아보고 임계 응력을 가정하여 off-time 온도 변화에 따른 m값과 n값의 변화를 연구하였다.

## 2. 컴퓨터의 모사 조건

컴퓨터 모사를 이용하여 electromigration에 의하여 배선에 발생하는 시간에 따른 응력의 값을 얻을 수 있었다. Electromigration에 의하여 발생하는 응력은 Korhonen[11]이 제시한 식을 따른다고 가정하였고, 주어진 경계조건에서 Korhonen의 식을 풀어서 각 배선 위치에서의 시간에 따른 응력의 분포를 얻을 수 있다. 배선의 전체 길이는 50 $\mu$ m인 poly crystalline으로 가정하였고, on-time 온도는 473K, off-time 온도는 298K, 453K, 473K로 변화시켰다. 배선에 흐르는 전류밀도는 각각 1, 1.5, 2, 2.5MA/cm<sup>2</sup>로 변화 시켰고, 주파수는 1 $\times$ 10<sup>-3</sup>Hz에서부터 1 $\times$ 10<sup>3</sup>Hz까지 변화 시켰다. Duty factor는 각각 0.25, 0.5, 0.75, 1(DC)로 변화시켜서 시간에 따른 응력의 변화와 위치에 따른 응력 분포에 대한 결과를 얻었다. 또한 일반화된 Black의 식으로부터 임의의 임계 응력 값을 가정하여 양변을 로그함수를 취하여 배선의 파손 시간을 구한 결과 주파수가 500Hz 일 때 배선 수명의 전류밀도 의존성(n)과 duty factor 의존성(m)에 대한 결과를 얻을 수 있었다.

## 3. 결과 및 고찰

Off-time 온도를 298K, 473K로 변화시키면서 전류 밀도를 1MA/cm<sup>2</sup>, duty factor는 0.5로 고정시킨 상태에서 주파수변화에 의한 시간과 위치에 따라 배선에 발생하는 응력에 대하여 컴퓨터 모사를 하였다. On, Off-time 의 온도를 473K로 가정한 경우에는 주파수가 높을수록 높은 응력이 발생하는 결과를 확인할 수가 있었다. 또한 1Hz 이상에서는 같은 응력의 변화가 작았으나 주파수가 낮아질수록 더 낮은 응력이 발생하였다. 또한 off-time 온도가 298K인 경우에는 시간이 지남에 따라 발생한 응력이 주파수에 상관없이 거의 일정한 값을 가지고, 발생하는 응력도 DC인 경우와 비슷한 결과를 보였다.

Off-time 온도를 298K, 473K로 변화시키면서 전류 밀도를 1MA/cm<sup>2</sup>, duty factor는 0.5로 고정시킨 상태에서 주파수변화에 의한 시간과 위치에 따

라 배선에 발생하는 응력에 대하여 컴퓨터 모사를 하였다. 주파수와 전류 밀도를 각각 500Hz와 1MA/cm<sup>2</sup>로 고정시키고 off-time 온도와 duty factor 변화에 따라 발생하는 응력의 변화를 알아보았다. Off-time 온도가 473K인 경우 duty 배선에 발생하는 응력은 duty factor에 비례하여 변화한다. 이는 off-time이 길수록 응력의 발생이 감소한다는 것을 뜻한다. off time 동안의 온도가 298K인 경우는 duty factor에 의한 응력의 변화가 거의 발생하지 않았다. 그러나 실제 배선에서의 off-time 온도를 고려하여 on-time 온도보다 12K 낮은 온도가 적용된다는 결과로부터[12] off-time 온도를 453K로 적용한 배선의 시간에 따른 응력의 발생은 duty factor에 비례하지 않는 양상을 보였다.

배선 수명의 duty factor 의존성은 일반화된 Black의 식으로부터 구할 수가 있다. 본 연구에서는 임계 응력 값을 가정한 후, 각각의 duty factor에서 배선의 파손시간을 예측하여 온도 변화에 따른 m값을 얻을 수가 있었다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 Off-time 온도가 473K인 m값이 2인 결과를 얻었는데 이는 average current density 모델에서 가정한 값과 일치한다. 또한 off-time 온도가 298K인 경우에는 m값이 on-time 모델에서 가정한 1의 값을 얻을 수 있었고, 실제 배선의 온도라 가정한 453K인 경우에는 2보다 낮은 m값을 나타내었다. 위의 사실로부터 실제 배선에서의 수명을 예측하기에 두 가지 모델 모두 부족하다는 것을 확인할 수 있었다.

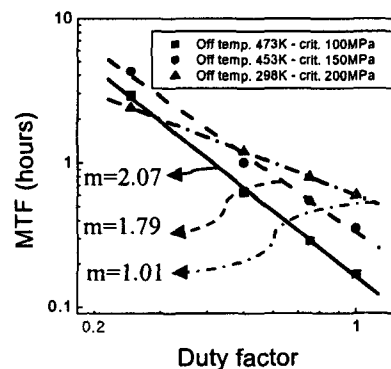


그림 1. Off-time 온도가 변할 때 duty factor와 배선의 수명의 시간. 주파수 500Hz, 전류 밀도 1MA/cm<sup>2</sup>.

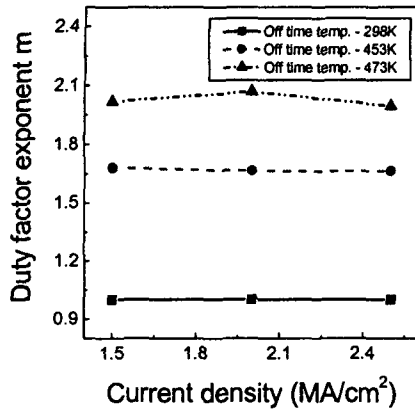


그림 2. Off-time 온도가 변할 때, 500Hz에서 전류밀도 변화에 따른 m값의 변화.

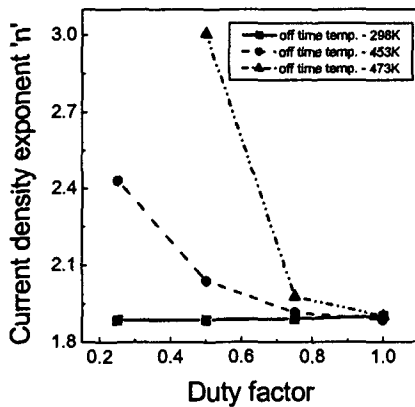


그림 3. Off-time 온도가 변할 때, 500Hz에서 duty factor 변화에 따른 n값의 변화.

Black의 식에서는 n 값과 m값은 duty factor와 전류 밀도에 독립적이라고 가정하고 있다. 이러한 가정을 확인하기 위해서 전류밀도의 증가에 따른 m값의 변화와 duty factor가 변함에 따른 n값의 변화에 대하여 알아보았다. 전류 밀도가 증가함에 따른 m값의 변화는 없었지만(그림 2) duty factor가 낮을수록 n값이 크게 증가한다는 새로운 사실을 알 수 있었고(그림 3) 이러한 결과로부터 Black의 식에서 가정한 독립된 duty factor와 전류 밀도가 서로 연관되어 상호 작용을 한다고 판단할

수 있었다.

#### 4. 결론

Off-time동안의 온도가 298K 이었을 경우 on-time 모델과 일치하는 결과를 얻을 수 있었고, off-time동안의 온도가 473K 이었을 경우 average current density 모델과 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 실제 배선에 흐르는 전류에 의한 off-time 동안의 온도를 고려하여, 그 온도를 453K 라고 가정하였을 경우에는 m값이 2의 값보다 낮은 결과를 보였다. 위의 사실로부터 off 시간 동안의 온도가 낮을수록 배선 수명의 duty factor 의존성이 2에서 1로 변화한다고 판단된다. 전류 밀도를 변화시켜서 배선 수명의 전류밀도의존성이 off 시간동안의 온도에 따라서 변하지 않는다는 사실을 확인할 수 있었고, 또한 duty factor가 낮을수록 배선 수명의 n값이 급격하게 증가한다는 결과를 얻을 수 있었다. 그러므로 duty factor 변화와 전류밀도의존성과 값과 관련된 또 다른 연구가 필요하다고 생각된다.

#### 참고 문헌

- [1] R E. Hummel, International Materials Reviews, 39, 94, 1994.
- [2] J. R. Lolyd, "J. Phys. D: Appl. Phys., 32, R109, 1999
- [3] Gui X. IEEE Trans Electron Device 45, 380, 1998.
- [4] L. Arnaud, G. Reimbold, Microelectronics Reliability. 39, 773, 1999.
- [5] Black JR. IEEE Trans electron Device 16, 338, 1969.
- [6] Brooke L. IEEE/IRPS. 136, 1987
- [7] Hatanaka K, Nouguchi T, Maeguchi K symposium on VLSI Technology, 19, 1989.
- [8] Gui X, Dew SK, Brett MJ. J Appl Phys 80, 4948, 1996.
- [9] F. M. d'Heurle, Proc. IEEE, 59, 1409, 1971.
- [10] Gui X. IEEE Trans Electron Device ED-46, 70, 1999.
- [11] M.A. Korhonen, P.B rgesen, K. N. Tu and C. -Y. Li, J.Appl. Phys., 73, 3790, 1993.
- [12] W. wu, J.S. Yuan, Solid-state Electronics, 45, 2051, 2001.