

동적인 전기장이 다마신 구리 배선에서의 절연파괴에 미치는 영향

연한울¹ · 송준영¹ · 임승민¹ · 배장용² · 황유철² · 주영창^{1,†}

¹서울대학교 재료공학부, ²삼성전자 메모리사업부 개발QA팀

Effect of Dynamic Electric Fields on Dielectric Reliability in Cu Damascene Interconnects

Han-Wool Yeon¹, Jun-Young Song¹, Seung-Min Lim¹, Jang-Yong Bae², Yuchul Hwang² and Young-Chang Joo^{1,†}

¹Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 151-744, Korea

²Department of Device Solutions, Samsung Electronics, Gyeonggi-Do 443-742, Korea

(2014년 11월 30일 접수: 2014년 12월 12일 수정: 2014년 12월 24일 게재확정)

초 록: 다마신 구리 배선에서의 동적인 전기장에 따른 절연체 파괴거동을 연구하였다. DC, 단극성, 및 이극성 펄스 조건 중에서 절연체의 수명은 이극성 펄스 조건에서 가장 길었다. DC 및 단극성 펄스 조건에서는 절연체에 가해지는 전기장의 방향이 바뀌지 않지만 이극성 펄스 조건에서는 전기장의 방향이 반복적으로 180도 바뀌기 때문에, 이극성 펄스 조건에서는 절연체의 구리오염이 억제되고, 이로 인해서 절연체 수명이 이극성 펄스 조건에서 가장 긴 것으로 판단된다. 단극성 펄스 조건에서 펄스 주파수가 커질수록 DC 조건보다 절연체의 수명이 증가하였다. 이는 절연체 수명에 구리오염 뿐만 아니라 내재적인 절연파괴현상이 상당한 영향을 미치며, 절연체 분자결합파괴가 일어날 확률은 펄스 폭이 좁아질수록 감소한다고 판단된다.

Abstract: Effect of dynamic electric fields on dielectric breakdown behavior in Cu damascene interconnects was investigated. Among the DC, unipolar, and bipolar pulse conditions, the longest dielectric lifetime is observed under the bipolar condition because backward Cu ion drift occurs when the direction of electric field is changed by 180 degrees and Cu contamination is prohibited as a results. Under the unipolar pulse condition, the dielectric lifetime increases as pulse frequency increases and it exceed the lifetime under DC condition. It suggests that the intrinsic breakdown of dielectrics significantly affect the dielectric breakdown in addition to Cu contamination. As the unipolar pulse width decreases, dielectric bond breakdown is more difficult to occur.

Keywords: Dielectric breakdown, Cu damascene interconnects, Cu contamination, Dynamic electric field, Thermochemical model

1. 서 론

지속적인 실리콘 반도체 소자의 고집적화에 따라서 소자 내부에 가해지는 전기적 응력 및 열적 응력이 점차 커지고 있다. 반도체 메모리 소자에 적용되는 다마신 구리 배선의 노드 크기는 2017년도에는 20 nm 이하로 줄어들 전망이며 또한 배선간 절연체에는 0.4 MV/cm 크기의 전기장이 가해질 것이라고 예측하고 있다.¹⁻³⁾ 이에 따라 다마신 구리 배선에서의 절연체 파괴현상이 심각한 신뢰성 문제로 떠오르고 있다.^{4,5)} 통상적으로 절연체 수명은 정전압(DC) 하에서 시간의존적 절연파괴(Time dependent

dielectric breakdown, TDDB) 가속 실험을 통해서 예측하고 있다.²⁾ 하지만 대부분의 반도체 소자는 DC 전압이 아닌 단극성 혹은 이극성 펄스 형태의 동적인 전압에서 작동 하기 때문에, 배선 내 절연체에는 불연속적인 전기장이 가해진다. 그러므로 다마신 구리 배선에서의 절연체의 수명을 더욱 정확히 예측하기 위해서는 동적인 전기장이 절연파괴에 미치는 영향을 연구할 필요가 있다. TDDB 실험뿐만 아니라 동적인 전기장에 의한 절연파괴 현상에 대한 연구는 이전부터 진행되어 왔지만 보고된 결과는 차이를 보였다.^{6,9)} 한 연구그룹에서는 이극성 펄스 전기장 하에서 절연체 수명이 DC 및 단극성 조건보다 항

[†]Corresponding author
E-mail: ycjoo@snu.ac.kr

© 2014, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

상된 결과를 보고하였다.⁶⁾ 하지만 다른 그룹에서는 양극성 펄스조건에서의 절연체 수명이 가장 짧은 결과를 보고 했으며,⁷⁾ 또 다른 그룹에서는 동적인 전기장 조건(극성 및 주파수)과 상관없이 절연체 수명이 DC 조건과 같음을 보고하였다.^{8,9)} 이러한 결과 차이는 각 연구 결과의 TDDB기구가 다르기 때문이라고 판단할 수 있으나 현재까지 보고된 연구에서는 정확한 TDDB기구를 밝혀내지 않고, 추측만 한 상태이다. 트랜지스터 내 게이트 절연막 혹은 수동 회로 요소인 절연막의 경우에는 내재적 절연 파괴현상만을 고려하면 된다.²⁾ 하지만 다마신 구리 배선에서는 구리오염현상에 의한 외재적 절연파괴현상을 내재적 절연파괴현상과 함께 고려해야 한다.¹⁰⁾ 그러므로 동적인 전기장의 영향을 연구하는 것과 함께 다마신 구리 배선에서의 TDDB기구를 정확하게 규명하는 것이 요구된다. 내재적 절연파괴 및 구리 오염현상은 온도의존성을 갖기 때문에 온도변화에 따른 절연수명을 평가하는 것이 특히 중요하다.^{2,10)} 하지만 이전 연구에서는 온도조건을 일정하게 유지한 채, 전기장의 극성 및 주파수 변화에 따른 TDDB 결과 변화만을 보고하였다.⁶⁻⁹⁾

본 연구에서는 동적인 전기장 극성 조건 및 펄스 주파수, 전기장의 크기를 조절하는 것뿐만 아니라 환경온도를 조절하며 TDDB 실험을 진행하였다. 절연체 수명의 활성화에너지 도출을 통해서 TDDB기구가 변화하는 것을 예측하였다. 이를 이용하여 동적인 전기장 조건에 따라서 절연체 수명이 변화하는 원인을 고찰하였다.

2. 실험 방법

동적인 전기장에 의한 다마신 구리 배선의 절연파괴현상을 연구하기 위해서 65 nm DRAM 메모리 공정에서 TDDB 시편을 제작하였다. Figure 1(a)는 TDDB 시편의 모식도를 나타낸다. TDDB 구조는 comb-serpentine 이며, 배선 간 거리는 100 nm이다. 절연물질로 SiO₂를 플라즈마 강화 화학적 기상증착(PECVD)법을 이용하여 증착하였다. Ta/TaN 및 SiN_x 박막을 각각 확산방지막과 캐핑층으로 사용하였다. TDDB 실험은 Qualitau 사의 ACE 장비를 사용하여 패키지 레벨에서 진행하였다. 환경온도는 150~225°C로 설정했으며, 4.5~6.5 MV/cm 크기의 전기장을 DC, 단극성, 그리고 이극성 형태로 SiO₂ 절연막에 가했다. 펄스 전기장의 반복률은 50%로 고정시켰다(Fig. 1(a)). TDDB 실험 시 전기장을 가하기 위해서 serpentine 배선에 전압을 가하고 comb 배선에는 접지를 시켰다. 펄스전기장 주파수는 1~100 kHz로 조절하였다. TDDB 실험에서의 고장수명(time to failure, TTF)이란 시편의 누설전류가 급격히 증가하여 더 이상 절연체 역할을 못할 때의 시간을 일컫는다.¹¹⁾ 우리는 TTF를 시편의 누설전류가 급격히 증가하여 10⁻⁵ A로 도달했을 때의 시간으로 정의하였다.¹²⁾ 단극성 펄스조건에서는 전압을 가한 시간만을 합하여 TTF를 계산하였다. 절연체 파괴기구는 weakest

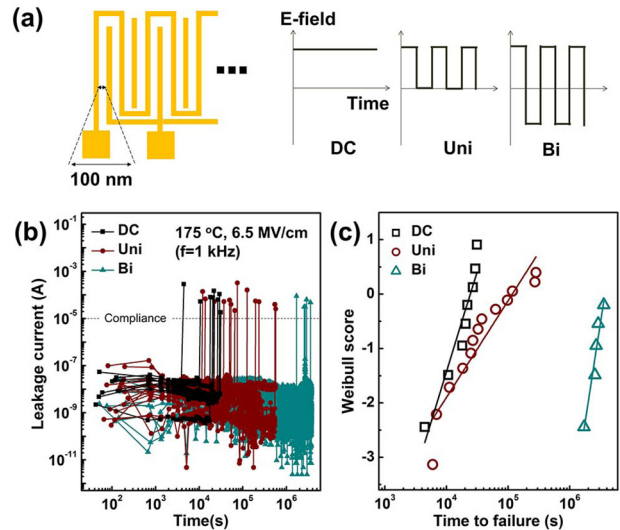


Fig. 1. (a) Schematic of the comb-serpentine pattern of Cu damascene interconnects and shapes of dynamic electric field (b) log-log plot of TDDB test at 175°C under 6.5 MV/cm and pulse frequency of 1 kHz. (c) Weibull plot of the TTF results.

link model을 따르기 때문에, TDDB 결과는 와이بل통계를 따른다고 알려져 있다.¹³⁾ 그러므로 와이بل통계처리를 통해서 63.2%의 시편이 파괴되는 시간($t_{63.2}$)을 TDDB 실험 조건에 따라 비교하였다.¹³⁾

TDDB 실험 중 구리오염 여부를 알아내기 위해서 TDDB 실험을 중단하고 시편을 ACE 장비에서 꺼낸 뒤 100°C의 온도에서, Triangular voltage sweep (TVS) 실험을 실시하였다.¹⁴⁾ TDDB 실험 중단시간은 통계적으로 $t_{63.2}$ 의 반으로 설정하였다. TVS 실험은 Agilent 4156C parameter analyzer 장비를 이용하였다.

3. 연구 결과

Figure 1(b)는 175°C 온도 및 6.5 MV/cm 크기의 전기장 하에서 펄스 주파수가 1 kHz일때 TDDB 실험 결과를 나타낸다. 그리고 TTF 결과를 와이بل 통계 처리하여 Fig. 1(c)에 나타내었다. DC, 단극성, 및 이극성 펄스 조건에서 이극성 펄스조건에서의 절연체 수명($t_{63.2-Bi}$)이 가장 길었고, DC 조건에서의 절연체 수명($t_{63.2-DC}$)이 가장 짧았다.

175°C 외에도 온도조건을 200°C 및 225°C로 변화시켜서 TDDB 실험을 진행하였고 $t_{63.2}$ 값을 Arrhenius plot화 하였다(Fig. 2(a)). 모든 환경온도 조건에서 이극성 펄스 조건에서 절연체의 수명이 가장 길었고, 단극성 펄스 조건 하에서의 절연체 수명($t_{63.2-Uni}$)이 DC 조건보다 비슷하지만 조금 더 긴 결과가 나왔다. DC, 단극성, 및 이극성 펄스조건에서의 활성화 에너지 값은 각각 1.09, 1.44, and 0.59 eV 이다. 이러한 결과는 이극성 펄스 조건에서의 TDDB기구는 DC 및 단극성 펄스 조건에서의 TDDB 기구와 차이가 나고, DC 및 1 kHz의 단극성 펄스 조건에서

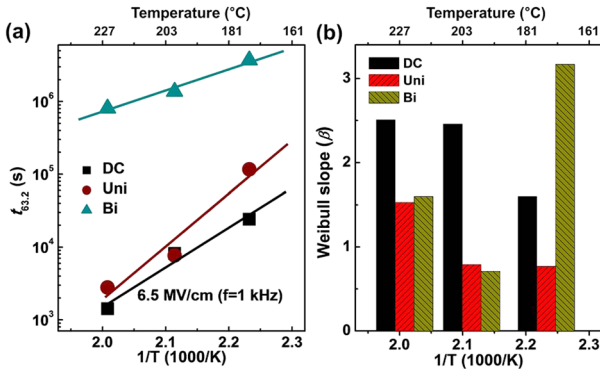


Fig. 2. (a) Arrhenius plot of $t_{63.2}$ and (b) characteristics of the Weibull slope (β) under the DC, unipolar, and bipolar pulse conditions.

는 TDDB 기구가 비슷함을 의미한다. 전기적 극성 조건에 따라 와이블 기울기(β)도 변화한다(Fig. 2(b)). 하지만 환경온도 따른 β 변화는 일정한 경향을 보이지 않았다. β 값은 절연파괴방식을 나타내기 때문에¹³⁾, 극성 조건 및 온도도에 따른 β 변화를 분석하는 추가적인 연구를 할 필요가 있다.

우리는 이전에 구리오염이 지배적인 TDDB기구일 때, 이극성 펄스조건에서는 구리오염이 DC 조건보다 억제되기 때문에, 이극성 펄스조건에서의 절연체 수명이 DC 조건보다 긴 것을 보고하였다.¹⁵⁾ 구리는 SiO_2 안에서 구리 이온(Cu^+)화 되고 절연체에 가해지는 전기장에 의해서 구리오염속도가 증가한다고 알려져 있다.^{12,15)} 이극성 펄스 조건에서는 전기장의 방향이 180도 바뀌기 때문에 SiO_2 로 들어갔었던 Cu가 다시 배선 방향으로 빠져나가지만¹⁵⁾, DC 조건과 단극성 펄스조건에서는 구리 이온의 전기장에 의한 이동속도가 같다. 그러므로 6.5 MV/cm 전기장 하에서 펄스주파수가 1 kHz일때의 TDDB 결과($t_{63.2\text{-Bi}} > t_{63.2\text{-Uni}} \sim t_{63.2\text{-DC}}$)는 구리 오염이 절연체 파괴에 상당한 영향을 미친다는 것을 의미한다.

Figure 3는 TDDB 실험 전, 후 TVS 실험 결과를 나타낸다. 225°C의 온도에서 6.5 MV/cm 크기의 전기장으로 TDDB 실험을 진행한 후, 100°C의 환경온도에서 시편에 40 V부터 -40 V까지 전압을 인가하였다. DC조건에서 TDDB 실험을 700초 동안 진행한 시편의 경우 TVS peak이 발견되었다. 하지만 이극성 펄스 주파수가 1 kHz인 조건에서 TDDB 실험을 한 시편의 경우, TDDB 실험 시간이 80,000초가 넘었음에도 불구하고 TVS peak이 검출되지 않았다. 이 결과를 통해서 DC조건의 TDDB실험에서는 구리오염이 발생했지만, 이극성 펄스 조건에서는 구리오염이 거의 발생하지 않았다고 판단할 수 있다. 하지만 이전 연구결과에서는 TDDB 실험 시 구리오염이 발생한다면, 실험 도중에 시편의 누설전도도가 증가하는 경향을 보였지만¹²⁾, 본 연구의 결과에서는 누설전류가 급격히 증가하는 현상만을 보였다(Fig. 1(b)). 이는 TDDB 실험 시 SiO_2 로 침투하는 구리 유동량의 차이에서 기인했

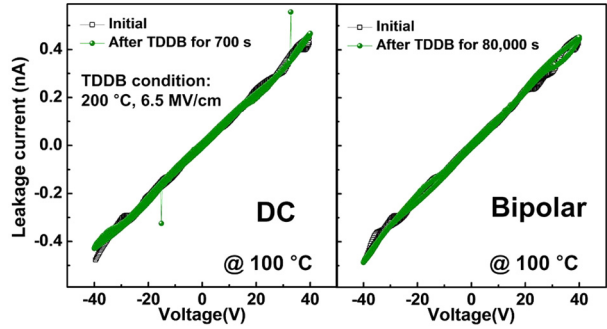


Fig. 3. TVS tests for the devices after TDDB tests under the DC condition and the bipolar pulse condition. TDDB test condition is a temperature of 225°C, an electric field of 6.5 MV/cm, and a bipolar pulse frequency of 1 kHz.

다고 생각한다. 이전에 보고한 TDDB 실험의 시편은 Cu 배선이 확산방지막 없이 SiO_2 절연막에 직접적으로 접촉된 구조였다. 그러므로 본 연구의 다마신 구리배선에서 구리오염이 발생하더라도 SiO_2 로 침투하는 양이 시편의 누설전도도를 변화시킬 수 있을 만큼 많지 않다고 생각한다. 이러한 점은 본 연구의 TDDB 기구는 구리오염뿐만 아니라 절연물질의 내재적인 파괴가 절연체의 수명에 영향을 미친다는 것을 내포한다.

Fig. 4(a)는 175°C 온도 및 6.5 MV/cm 크기의 전기장 하에서 단극성 펄스 주파수 조건이 1~100 kHz로 변할 때의 TDDB 실험 결과를 나타낸다. 그리고 TTF 결과를 와이블 통계 처리하여 Fig. 4(b)에 나타내었다. 주파수가 1 kHz에서 1 Hz로 감소했을 때, $t_{63.2\text{-Uni}}$ 값은 감소하여 $t_{63.2\text{-DC}}$ 와 거의 같은 결과가 나왔다. 또한 주파수가 100 kHz까지 증가함에 따라서 $t_{63.2\text{-Uni}}$ 값도 증가했다. 환경온도를 200, 225°C로 증가시켰을 경우에도 단극성 펄스 주파수 크기에 따라서 $t_{63.2\text{-Uni}}$ 값이 증가했다(Fig. 5(a)). 또한 주목할 점은 $t_{63.2\text{-DC}}$ 와 $t_{63.2\text{-Uni}}$ 이 같은 임계 펄스주파수가 존재한다는 점이다. 전기장에 의한 절연물질 내 구리 이온 침투량은 DC조건과 단극성 펄스 조건에서 같다고 볼 수 있다. 즉, 구리오염이 지배적인 TDDB 기구라면 단극성 펄스 조건에서의 절연체의 수명은 펄스 주파수 값에 상관없이 DC

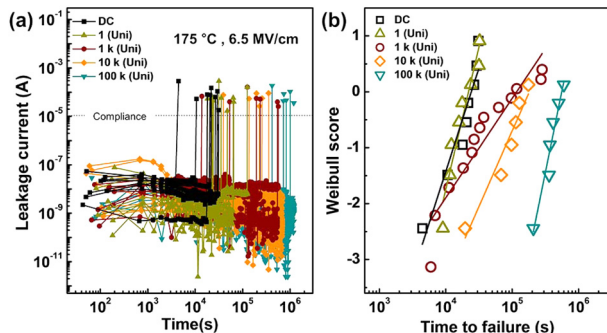


Fig. 4. (a) Variations in leakage current during the TDDB tests at 175°C under 6.5 MV/cm. Unipolar pulse frequencies varied from 1 to 10 kHz. (b) Weibull plot of the TTF results.

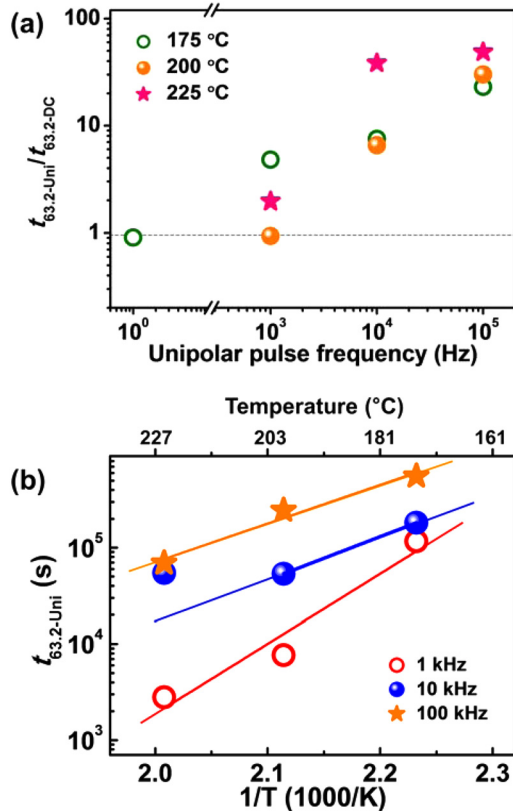


Fig. 5. Proportion of $t_{63.2-DC}$ to $t_{63.2-Uni}$ as a function of the unipolar pulse frequency. Dielectric lifetime increases with increases in the unipolar pulse frequency regardless of the testing temperature. (b) Arrhenius plot of $t_{63.2-Uni}$ with regard to the unipolar pulse frequency.

조건일 때와 수명이 같아야 한다.

그러므로 우리의 결과는 SiO_2 절연물질의 신뢰성에 구리 오염뿐만 아니라 내재적 파괴가 상당한 영향을 미친다는 것을 제시한다. 또한 내재적 파괴가 발생할 확률은 단극성 펄스주파수 증가에 따라서 감소한다고 판단할 수 있다. Fig. 5(b)는 단극성 펄스 주파수 조건에 따른 $t_{63.2}$ 값을 Arrhenius plot한 결과를 나타낸다. 단극성 주파수가 증가할수록 활성화 에너지 값은 감소하는 추세를 보였다. (1.00 eV at 1 kHz, 0.89 eV at 10 kHz, 0.80 eV at 100 kHz). 이러한 결과는 주파수 증가에 따라 내재적 파괴기구의 영향이 줄어들어 따라서 TDDB 파괴기구가 변화한다는 주장을 뒷받침한다.

내재적 파괴 기구는 크게 hole injection¹⁶⁾과 thermochemical 결합파괴^{11,17)}로 나눌 수 있다. 우선 hole injection은 10 MV/cm 이상의 전기장이 가해졌을 때 발생하는 impact ionization 혹은 electron tunneling에 의해서 유발되는 현상이다.¹⁸⁾ 시편의 절연체 두께와 물질에 가해지는 전기장의 크기를 고려한다면 impact ionization 혹은 electron tunneling 현상이 발생하기 어렵기 때문에 hole injection은 일어나기 어렵다고 판단된다. Thermochemical 모델은 전기장과 절연물질 내 극성결합인 분자와 전기장의 상호작용을 기반으로 정립되었다. 분자결합의 쌍극자 모멘트의 방향과 전기장의 방향이 평행일 때 분자결합에는 인장응력이 가해진다.¹¹⁾ 인장응력을 받는 분자결합은 끊어질 확률이 높아지며, 끊어진 결합들이 절연물질 내 전도성 경로를 형성한다. 우리는 thermochemical 모델을 기반으로 절연체 수명에 미치는 단극성 펄스 주파수의 영향을 고찰하였다. Thermochemical 모델에 의하면 전기장이 가해졌을 때 인장응력에 의해서 결합길이가 늘어난 Si-O 분자들은 전기장이 가해지지 않으면 결합이 이완된다. 단극성 펄스 조건에서 Si-O 분자들이 인장과 이완을 반복하게 된다. 즉, DC 및 단극성 펄스 조건에서 분자결합에 가해지는 총 인장시간은 같다고 볼 수 있지만, 단극성 펄스 조건에서는 분자결합이 이완되는 시간도 동시에 존재한다. 그러므로 Si-O 파괴결합이 일어날 확률은 총 인장 시간 길이 뿐만 아니라 펄스 사이클 한 주기에서 분자결합이 인장되는 시간의 길이에 영향을 받는다고 판단할 수 있다. 즉, 한 주기에서 분자결합이 늘어나는 시간이 짧아질수록 결합파괴가 일어날 확률이 감소한다고 판단할 수 있다. 단극성 펄스 주파수가 커질수록 내재적 파괴가 일어날 확률이 줄어들기 때문에 구리오염이 TDDB기구에 미치는 영향이 커질 것이라 사료된다.

4. 결 론

다마신 구리배선에서 동적인 전기장에 의한 TDDB 현상 변화 고찰을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다. DC, 이극성, 및 양극성 펄스 조건에서, SiO_2 절연체의 신뢰성은 양극성 펄스 조건에서 가장 우수한 것으로 나타났다. DC 및 이극성 펄스 조건에서는 절연체에 가해지는 전기장의 방향이 일정하지만, 양극성 펄스 조건에서는 전기장의 방향이 번갈아 바뀌기 때문에 절연체로의 구리오염을 억제하기 때문이다. 이극성 펄스 조건에서 펄스주파수 크기가 특정 값을 넘어가면 DC 조건에서의 절연체 수명보다 증가하는 것으로 나타났다. 이는 절연체의 수명에 구리오염 현상뿐만 아니라 절연체의 내재적 파괴현상이 상당한 영향을 미치는 것을 의미한다. 또한 절연물질 내 분자결합 파괴가 일어날 확률은 펄스 폭이 줄어들수록 감소한다고 판단된다. 실제 반도체 소자에 가해지는 펄스 주파수는 수 MHz이다.³⁾ 그러므로 비록 본 연구에서는 분자결합과 단극성 펄스 주파수의 물리적인 관계를 정확하게 규명하지 못했지만, DC 조건에서 TDDB 신뢰성 평가를 하는 것은 절연체의 수명을 과소평가하는 것이며 소자의 작동 펄스 주파수가 커질수록 절연체의 수명이 증가한다고 제시할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(산업자원통상부)의 재원으로 반도체연구조합의 산업기술혁신사업 지원을 받아 수행

된 것임(10035430)을 밝힙니다.

References

1. J. Gambino, F. Chen and J. He, "Copper Interconnect Technology for the 32 nm Node and Beyond", IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC), pp. 141-148 (2009).
2. J. W. McPherson, "Reliability Physics and Engineering", pp.63-176, Springer, New York (2010).
3. Interconnects, International Technology Roadmap for Semiconductors. Inc. Dec. (2012) from <http://www.itrs.net/>
4. N. I. Cho, "Deposition Technology of Copper Thin Films for Multi-level Metallizations", J. Microelectron. Packag. Soc., 9(3), 1 (2002).
5. J. Y. Shim, Y. S. Moon and J. H. Lee, "Electrochemical Study of the Effect of Additives on High Current Density Copper Electroplating", J. Microelectron. Packag. Soc., 18(2), 43 (2011).
6. F. Chen, O. Bravo, K. Chanda, P. McLaughlin, T. Sullivan, J. Gill, J. Lloyd, R. Kontra and J. Aitken, "A Comprehensive Study of Low-k SiCOH TDDB Phenomena and ITs Reliability Lifetime Model Development", Proc. 44th Annual IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), San Jose, CA, 46, IEEE (2006).
7. H. Miyazaki, D. Kodama and N. Suzumura, "The Observation of Stress-Induced Leakage Current of Damascene Interconnects after Bias Temperature Aging", Proc. 46th Annual IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), Phoenix, AZ, 150, IEEE (2008).
8. E. Chery, X. Federspiel, G. Beylier, C. Besset and D. Roy, "Back-End Dielectrics Reliability under Unipolar and Bipolar AC-Stress", Proc. International Reliability Physics Symposium (IRPS), Anaheim, CA, 3A.5.1, IEEE (2012).
9. S.-C. Lee, A. S. Oates, "Reliability of Porous Low-K Dielectrics under Dynamic Voltage Stressing", Proc. International Reliability Physics Symposium (IRPS), Anaheim, CA, 3A.2.1, IEEE (2012).
10. T. K. S. Wong, "Time dependent dielectric breakdown in copper low-k interconnects: Mechanisms and reliability models", Mater., 5(9), 1602 (2012).
11. J. W. McPherson and H. C. Mogul, "Underlying physics of the thermochemical e model in describing low-field time-dependent dielectric breakdown in SiO₂ thin films", J. Appl. Phys., 84(3), 1513 (1998).
12. S. S. Hwang, S. Y. Jung and Y. C. Joo, "Characteristics of leakage current in the dielectric layer due to Cu migration during bias temperature stress", J. Appl. Phys., 104, 044511 (2008).
13. H. Pham, "Handbook of Reliability Engineering", pp.3, Springer, London (2003).
14. I. Ciofi, Z. Tökei, D. Visalli and M. Van Hove, "Water and Copper Contamination in SiOC:H Damascene: Novel Characterization Methodology based on Triangular Voltage Sweep Measurements", Proc. International Interconnect Technology Conference (IITC), Burlingame, CA, 181, IEEE (2006).
15. S. Y. Jung, B. J. Kim, N. Y. Lee, B. M. Kim, S. J. Yeom, N. J. Kwak and Y. C. Joo, "Bias polarity and frequency effects of Cu-induced dielectric breakdown in damascene Cu interconnects", Microelectron. Eng., 89, 58 (2012).
16. K. H. Lee and S. A. Campbell, "The kinetics of the oxide charge trapping and breakdown in ultrathin silicon dioxide", J. Appl. Phys., 73 (9), 4434 (1993).
17. J. W. McPherson, "Determination of the nature of molecular bonding in silica from time-dependent dielectric breakdown data", J. Appl. Phys., 95(12), 8101 (2004).
18. B. J. Schlund, J. Suehle, C. Messick and P. Chaparala, "A new physics-based model for time-dependent dielectric breakdown", Microelectron. Reliab., 36(11), 1655 (1996).