



저작자표시-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

동적인 전기장에 의한 다마신 구리
배선에서의 절연파괴 거동 연구

Effect of Dynamic Electric Field on
Dielectric Breakdown in
Cu Damascene Interconnects

2014년 2월

서울대학교 대학원

재료공학부

송 준 영

초록

본 연구에서는 다마신 구리 배선의 절연체에 동적인 전기장을 인가한 뒤, 그 수명시간 측정을 통해, 절연파괴의 거동을 연구하고 주요한 절연파괴기구를 분석하였다. 소자가 미세화됨에 따라 RC-delay 성능을 향상시키기 위해, 다마신 구리 배선이 도입되었으나, 확산이 용이한 구리의 특성과 다마신 공정의 복잡성으로 인해 절연파괴가 취약해졌다. 절연파괴의 요인을 찾아 개선해야 하지만, 다마신 구리배선의 절연파괴 지점을 찾기가 어렵고, 실제 찾더라도 그 파괴기구를 분석하는 것이 쉽지 않아 상황에 따라 여러 모델이 제안되어왔다. 지금까지 알려진 대표적 다마신 구리배선의 절연 파괴기구는 절연물질 자체가 파괴되는 내재적 파괴기구와 구리 이온이 절연체로 이동하여 파괴가 발생하는 외재적 파괴기구가 있지만, 현재까지도 정확한 파괴기구를 규명하기 어려운 상황이다.

또한 기존의 파괴기구는 DC 를 바탕으로 제안되어 왔으나, 실제 소자에 가해지는 전기장은 DC 만이 아니라 단극성, 이극성 전기장이 인가됨에 따라 동적인 전기장에 대한 절연파괴성능 확인이 필요하다. 이에 동적인 전기장에서의 수명시간을 측정하고, 주요한 절연파괴기구를 확인하였다.

본 연구에 사용된 구리-SiO₂ 다마신 배선에서는 6.5 MV/cm, 1 kHz 주파수 조건에서 DC 와 단극성 펄스의 수명시간이 유사하였으며, 이극성 펄스 조건의 수명시간이 긴 것으로 보아, 이극성 펄스 조건에서는 구리이온의 이동이 제한됨을 예상할 수 있었다. 이는

이극성 전기장에서의 낮은 activation energy, DC/이극성 전기장에서의 triangular voltage sweep 차이 그리고 양의 temperature coefficient resistance 를 통해 구리이온의 절연체 내부 존재를 확인함으로써 검증할 수 있었다.

또한, 단극성 펄스 조건에서는 주파수가 증가할수록 수명시간의 증가를 보였는데, 이는 내재적 절연파괴가 영향을 미쳤다고 판단할 수 있으며, 이 현상은 내부 절연물질의 분자결합의 피로 파괴거동으로 설명하였고, 추가적으로 외재적 절연파괴 관점에서 절연체 내부 구리이온의 가속시간 영향성을 검토하였다. 동적인 전기장에서의 구리배선의 절연파괴 특성을 분석함으로써 구리배선에서 절연파괴 기구를 명확히 할 수 있다.

주요어: 절연파괴, 다마신 구리배선, 단극성, 이극성, 피로파괴, 가속시간

학 번: 2012-20610

목 차

1. 서론	
1.1. 다마신 구리 배선의 TDDB	1
1.2. 동적인 전기장에서의 절연파괴 연구의 필요성	2
1.3. 본 논문의 구성	3
2. 이론적 배경	
2.1. 내재적 절연 파괴	4
2.1.1. Thermochemical model	7
2.2. 외재적 절연 파괴	9
2.2.1. 외재적 E-model.....	10
2.3. 절연 파괴 메커니즘 분석 방법	14
2.3.1. Conduction mechanism 분석.....	14
2.3.2. Temperature coefficient resistance 분석	17
2.3.3. Triangular voltage sweep 분석	20
2.4. 동적인 전기장에 의한 절연파괴 선행연구.....	22
3. 실험방법	
3.1. 절연 파괴시료 제작 및 구조	25
3.2. TDDB실험 장비 및 방법.....	25
3.3. 절연파괴 전기적 특성 분석.....	29

4. 실험결과 및 고찰	
4.1. DC에서의 수명실험 결과.....	31
4.2. 동적인 전기장에서의 수명실험 결과	33
4.2.1. 전기적 분석 방법을 통한 절연파괴 메커니즘 확인 .	38
4.3. 단극성 전기장에서의 주파수 변경에 따른 절연 파괴수명	42
4.3.1. Thermochemical fatigue model.....	44
4.3.2. 주파수에 따른 구리이온의 이동 속도	48
5. 결론	52
참고 문헌.....	54
Abstract.....	58

LIST OF FIGURES

Figure 1-1 Roadmap of Dram interconnect dielectric thickness and electric field

Figure 2-1 electrons will have sufficient thermal energy to be thermally emitted(TE) over the barrier. More probable, under high fields, the electrons will Fowler-Nordheim(F-N) tunneling through the barrier. Any electrons reaching the anode will have to thermalize(release their excess energy), occasionally creating an energetic hole which can tunnel back into the gate oxide. A weak bond will serve as a hole trap. This is basis for the anode hole injection(AHI) $1/E$ model.

Figure 2-2 In Anode hole injection model, hydrogen bonds are thought to be broken by electrons. Released hydrogen atoms(or ions) may diffuse(drift) into the bulk of silica whereby they are postulated to create damage.

Figure 2-3 (a) Normal tetrahedral polar bonding of the Si-ion to the four neighboring O-ions is shown. Arrows indicate the directions of the electric dipole moment for each Si-O bond. (b) Bond-distortion is caused by the local electric field E_{loc} .

Figure 2-4 Illustration of TDDB degradation steps

Figure 2-5 (a) Cu^+ in periodic potential well without stress (b) Cu^+ in periodic potential well under an electric field

Figure 2-6 1-D copper ion diffusion illustration

Figure 2-7 (a) Leakage current of Al/SiO₂/Si MOS structure TDDB test (b) Leakage current of Cu/SiO₂/Si

Figure 2-8 leakage current of Cu/SiO₂/Si VRDB (a) Raw data of leakage current before BTS and after BTS, (b) Schottky fitting and permittivity (c) Poole frankel fitting and permittivity (d) Fowler nordheim fitting, Poole frenkel fitting

is resonable because of relative permittivity 3.19 (SiO_2 3.9)

Figure 2-9 Temperature-resistance relation of conducting filament of RRAM (a) TiN/ZrO₂/Pt (b)

Figure 2-10 Change compliance current was changed as Group A. 5×10^{-8} A, Group B. 1×10^{-6} A Group C. 1×10^{-4} A, Group B sample had negative TCR due to hopping conductin

Figure 2-11 group B samples showing a metal-insulator transition at critical temperature

Figure 2-12 Subsequent TVS traces measured at 200°C after 10 min BTS at (a) -0.8 MV/cm (b) 0.8 MV/cm

Figure 2-13 (a) Lifetime to the function of dwell time, TTF_{Bi} had the longest TTF, (b) Cu ion migration is retarded under bipolar condition

Figure 2-14 (a),(b) TTF_{DC} is similar with TTF_{Bi} at Cu/low-k interconnect

Figure 3-1 (a) Comb-serpentine structure (b) TEM image of test sample

Figure 3-2 Configuration of Qualitau ACE TDDB

Figure 3-3 (a) Definition of TTF & compliance current (b) Calculation of TTF under unipolar condition

Figure 3-4 Pulse shape of unipolar stress 45V (a) 10 Hz, (b) 1 kHz (c) 10 kHz (d) 100 kHz, Channel 1 is stress Channel 2 is GND.

Figure 3-5 Pulse shape of bipolar stress 45V (a) 10 Hz (b) 1 kHz (c) 10 kHz (d) 100 kHz Channel 1 is positive stress, Channel 2 is negative stress

Figure 3-6 Schematic of electric field during DC, unipolar and bipolar TDDB test

Figure 3-7 Probe station heater for ceramic package

Figure 4-1 Leakage current of TDDB test under 225 °C, 6.5 MV/cm

Figure 4-2 (a) Weibull plot of DC TDDB data under 225 °C 4.5, 5.5, 6.5 MV/cm (b) result of intrinsic/extrinsic E-model fitting

Figure 4-3 (a) Leakage current of DC, unipolar, bipolar, (b) Weibull plot of TTF data

Figure 4-4 Weibull plot of various temperature stress. TTF tendency was not changed with stressing temperature

Figure 4-5 Arrhenius plot of dynamic electric field TTF to the function of 1/T, Ea of DC is similar with Unipolar, however Ea of bipolar is smaller than DC & unipolar

Figure 4-6 (a) VRDB data of initial and after BTS(200 °C, 6.5 MV/cm), (b) Schottky fitting

Figure 4-7 Resistance of dielectric broken down sampling to the function of temperature, TCR is around $2.2 \cdot 10^{-3}/K$ which is similar with cu nanowire TCR of 15nm diameter($2.5 \cdot 10^{-3}/K$)

Figure 4-8 Leakage current of TVS (a) initial, DC BTS (b) initial Bipolar BTS, leakage current peak was observed when DB BTS was applied

Figure 4-9 (a) Leakage current of DC, unipolar 1 kHz, 10kHz, 100 kHz (b) Weibull plot of TDDB data, TTF increased as unipolar frequency increased.

Figure 4-10 TTF to the function of unipolar frequency under 175 °C ~225 °C

Figure 4-11 Stress is changed due to electric field polarity

Figure 4-12 Schematic of bond damage and TTF_{Uni} to the function of frequency, Over the threshold frequency bond damage decreased, so TTF_{Uni} increased.

Figure 4-13 Log of relative TTF to the function of Log pulse

frequency

Figure 4-14 When electric field is applied to Cu interconnect dielectric, Cu ion is accelerated with acceleration time.

Figure 4-15 (a) Cu ion drift distance is equal to DC when dwell time is equal to acceleration time (b) Cu ion drift distance is smaller than DC when dwell time is smaller than acceleration time

LIST OF TABLES

Table 2-1 Comparison of polar and non-polar dielectrics

Table 2-2 Cu interconnect TTF tendency under dynamic electric field of previous research

Table 4-1 Exponent a , threshold f_0 of experiment data

1. 서론

1.1. 다마신 구리 배선에서의 절연파괴

반도체 소자의 고집적화 및 성능향상이 진행되면서 기존에 사용되지 않았던, 많은 신규 물질 및 공정이 도입되고 있다. 그 중 반도체 배선에서는 RC-delay 를 개선하기 위해 알루미늄 배선에서 구리 배선으로, 절연물질은 low-k 로 변화되고 있다. Cu 배선을 적용하기 위해서는 건식식각이 어려운 구리의 특성상, 다마신 공정을 진행하여야 하고, 구리의 확산을 방지하기 위해 barrier 와 capping layer 가 도입되어야 했다. 하지만, 확산이 용이한 구리 및 공정 구조의 복잡성, 그리고 반도체 소자의 고집적화로 인해 기존 알루미늄배선에서는 소자의 신뢰성에 큰 영향이 없었던 배선의 절연파괴가 중요한 문제로 대두되었다. 다마신 공정 도입의 초기에는 barrier 및 capping layer 의 공정능력 저하로 구리가 절연체 내부로 이동하는 외재적 절연파괴가 주된 원인이었으나, 공정능력이 향상됨에 따라, 최근에는 구리배선에서도 내재적 절연파괴로 설명되는 경우가 나타나고 있다. 또한 미량이라도 구리가 절연체 내부에 존재하여 그 영향이 절연파괴에 영향을 미친다고 주장하는 논문도 출판되었다.[1]

또한 반도체 배선 공정의 미세화가 계속 진행되는데 반해, 동작전압은 그만큼 작아지지 못함에 따라 Figure 1-1 과 같이 배선 절연체가 받는 전기장의 크기는 계속 증가하고 있다.[2] 이에 절연체가 받는 전기장의 크기는 미세화가 진행될수록 계속 증가하여 구리 배선의 절연파괴현상이 소자 신뢰성의 주요한 원인이 되고 있다.

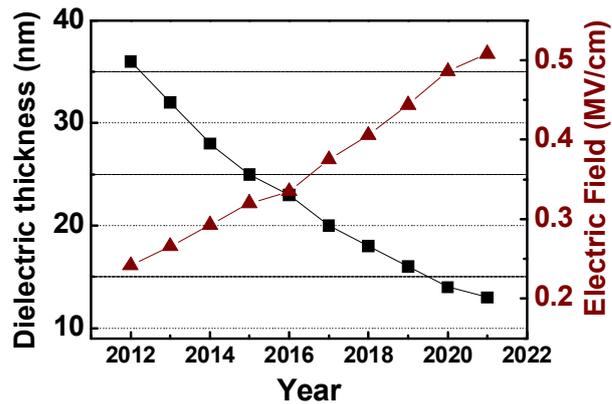


Figure 1-1 Roadmap of Dram interconnect dielectric thickness and electric field

이와 같이 공정이 계속적으로 발전하면서 절연파괴기구를 구명하는 일이 중요해졌고, 이를 바탕으로 실제 소자의 수명을 예측할 수 있어야 한다.

1.2. 동적인 전기장에서의 절연파괴기구 연구의 필요성

지금까지 기존연구에서는 소자의 배선 수명을 예측하기 위해서는 DC stress 를 인가하여 수명식을 도출한 뒤, 소자의 수명을 예측해 왔다. 하지만, 실제 소자에 가해지는 stress 는 단지 DC 만이 아니라 단극성, 이극성 전기장이 다양한 주파수와 duty cycle 로 인가가 된다. 단극성이나 이극성 전기장의 DC 에 대한 수명이 명확하지 않은 상황에서, 실 사용조건에 대한 정확한 수명을 예측하기 어렵다. 이에 DC, 단극성, 이극성에 대한 수명을 파악하고 또한 각 수명에 따르는 파괴기구를 고려함으로써 정확한 수명예측이 가능할 것이다.

1.3. 본 논문의 구성

본 논문에서는 Cu/SiO₂ 기반의 구리배선을 기반으로, TDDB(Time dependent dielectric breakdown) 실험을 다양한 전기장 및 주파수를 인가하여 수명을 분석하고 다양한 전기적 분석방법을 통해 주된 파괴기구에 대해 논하였다.

2 장에서는 실험 결과의 이론적 이해를 돕기 위하여 내재적 절연파괴 및 외재적 절연파괴 현상을 설명하고, 전기적으로 분석하는 다양한 방법의 이론적 배경에 대해 논하였다. 3 장에서는 본 연구에서 사용된 시편의 분석결과와 TDDB 장비 및 전기적 측정방법에 대해 설명하고, 마지막 4 장에서 DC, 단극성, 이극성 전기장에 대한 수명 결과와, 단극성 주파수별 수명시간 결과를 분석하고 이에 예상되는 수명 모델을 제안하였다.

2. 이론적 배경

2.1. 내재적 절연 파괴

구리배선의 절연파괴현상을 설명하기에 앞서, 이미 반도체 front-end 에서는 transistor 의 수명을 예측하기 위해 내재적 절연파괴 모델에 대한 많은 선행연구가 이루어져 왔다. Front-end 에서는 외재적 영향성이 있는 물질이 사용되지 않으므로, 순수 전기장에 의한 절연파괴현상에 대해서 분석이 이루어져왔고, 이 또한 여러 모델이 제안되어 왔다.[3] 그 중 대표적인 모델을 몇가지 소개하고 후속예 구리배선의 절연파괴모델에 차용될 Thermochemical model 에 대해 자세히 설명하고자 한다.

Thermochemical model 은 절연체 내부의 분자결합이 가해지는 전기적/열적 stress 로 인해 끊어지고 그 끊어진 부분이 전기적 path 를 형성하여 절연파괴가 발생하는 이론이다. 이 부분에 대해서는 2.1.1.에서 자세히 설명하도록 한다.

두 번째는 Anode hole injection model 이다. 이는 절연체에 가해진 전기장으로 인해 Fowler-Nordheim conduction 이 발생하고 여기서 가속된 전자가 anode 에 도달했을 때 electron 과 hole 이 발생되게 되고 여기서 발생된 hole 이 절연체 내부로 들어가면서 damage 를 만들고 이로 인해 conduction path 가 생성된다는 이론이다.[4]

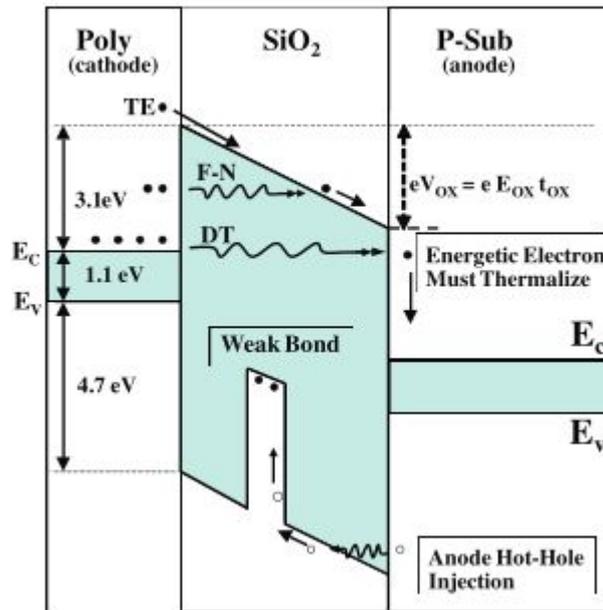


Figure 2-1 electrons will have sufficient thermal energy to be thermally emitted(TE) over the barrier. More probable, under high fields, the electrons will Fowler-Nordheim(F-N) tunneling through the barrier. Any electrons reaching the anode will have to thermalize(release their excess energy), occasionally creating an energetic hole which can tunnel back into the gate oxide. A weak bond will serve as a hole trap. This is basis for the anode hole injection(AHI) 1/E model.

AHI model 은 FN tunneling 을 기반으로 절연과피를 예상하는 model 이다. Gate dielectric 두께는 device 소형화 및 속도 향상을 위해 현재 nm 이하로 도입되어 FN tunneling 이 발생할 가능성이 있으나, 구리배선에서는 FN tunneling 이 발생할 수 있는 높은 전계가 가해지지 않은 상태이므로, AHI model 을 사용하기 어렵다.

세 번째로 Power-law voltage V^N model 이다. 이는 수 Å 의 얇은 oxide 의 절연과피모델이다. Si/SiO₂ 계면에 있는 Si-H 결합이 전자에 의해 끊어지고 수소가 절연체 내부로 이동하면서 절연체 내부에 있는 전자와 반응하여 conduction path 를 형성한다는 이론이다.[5]

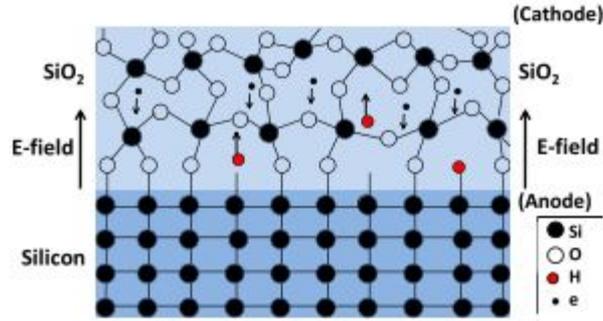


Figure 2-2 In Anode hole injection model, hydrogen bonds are thought to be broken by electrons. Released hydrogen atoms(or ions) may diffuse(drift) into the bulk of silica whereby they are postulated to create damage.

이 모델은 얇은 절연체의 파괴모델이어서 수십 nm 의 두께를 가지고 있는 절연체에서는 사용이 어렵다.

마지막으로 배선에서 전류의 영향으로 절연파괴가 일어나게 된다는 exponential $E^{1/2}$ model 이 있다. 이는 backend 의 절연파괴가 절연체 내부에 흐르는 전류 때문이라고 가정한 모델이다. 실제 배선에서는 두 번째로 언급한 F-N tunneling 이 발생이 어렵고, Poole-Frenkel 또는 Schottky conduction 이 발생하게 된다. 특히 low-k 에서는 PF conduction 이 주요하다고 주장하면서 다음과 같은 수식을 제안하였다.[6]

$$TF = D \exp \left[\frac{Q_{\text{barrierheight}} - \lambda \sqrt{E}}{k_b T} \right]$$

하지만 이 모델은 높은 barrier height 와 낮은 breakage energy 로 인해 실제 배선파괴 현상을 설명하기 어려운 측면이 있다.

2.1.1. Thermochemical model

앞에서 설명한 여러 내재적 파괴기구 중 이번 장에서는 thermochemical model 에 대해서 자세히 언급하도록 한다. 도입부에서 언급하였듯이 thermochemical model 은 절연체 내부의 분자 결합이 전기적/열적 stress 를 받아 끊어지게 되면, 그 끊어진 분자결합들이 conduction path 를 형성하게 된다는 이론이다.[7]

절연체로 사용되는 물질은 dielectric 으로 극성을 가지고 있다. 절연체에 전계가 인가되면, 그 극성으로 인해 내부 분자결합이 stress 를 받게 된다. 실제적으로 극성이 없는 물질에서는 TDDDB 경향이 발생하지 않음이 알려져 있다.

Table 2-1 Comparison of polar and non-polar dielectrics

Material	Dielectric constant	Bonding	TDDDB behavior
Germanium	6	Covalent	No
Silicon	12	Covalent	No
C(diamond)	6	Covalent	No
Silicon dioxide	3.9	Polar	Yes
Silicon Nitride	7.5	Polar	Yes

Figure 2-3 에서 보듯이 SiO₂ 절연체에 외부 전계가 인가되었을 때, 유전율 k 를 가진 절연체 내부의 분자결합에 미치는 local electric filed 에 의해 영향을 받게 된다.

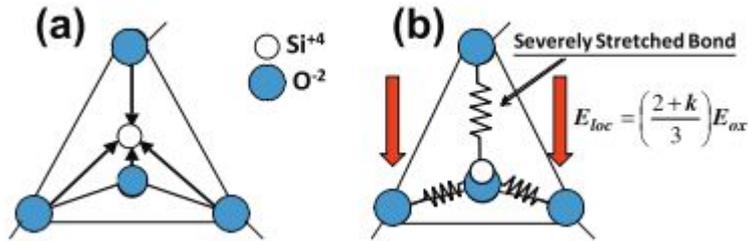


Figure 2-3 (a) Normal tetrahedral polar bonding of the Si-ion to the four neighboring O-ions is shown. Arrows indicate the directions of the electric dipole moment for each Si-O bond. (b) Bond-distortion is caused by the local electric field E_{loc} .

Local electric field 는 외부전기장에 의한 영향뿐만이 아니라 induced dipole moment 에 동시에 영향을 받게 된다. 이는 Mossotti electric field 이론에 의해 계산될 수 있으며, 아래와 같다.

$$E_{loc} = \left(\frac{2+k}{3}\right)E_{oxide}$$

만약 SiO₂ 의 dielectric constant 3.9 를 고려한다면, 분자 결합이 받는 전계는 가해준 전계 대비 약 2 배를 받게 된다. 이러한 전기적 stress 에 의해 Si-O bonding 이 끊어지게 되고, 이러한 끊어진 분자결합들이 conduction path 를 형성하게 되면 절연파괴가 발생하게 된다. 이 파괴기구의 수명은 아래와 같은 수식으로 설명된다.

$$Time to Failure = A_0 \exp(-\gamma E_{Oxide}) \exp\left(\frac{Q}{k_b T}\right)$$

γ 는 field acceleration parameter, Q 는 activation energy, A₀ 는 물질 의존적 상수이다. 그간 MOS 구조의 TDDB 연구결과를 바탕으로, field acceleration parameter 가 온도의존성이 있음이 알려졌고, 그 관계는 다음과 같다.

$$\gamma(T) = \left[\frac{\partial \ln(TF)}{\partial E} \right]_T = \frac{p_{eff}}{k_B T}$$

P_{eff} 는 분자내의 polar bonding 결합 정도와 상관성이 있으며, 이는 SiO_2 의 경우 이론상 7.5 eÅ 이며, TDDB 실험값은 7~14eÅ 을 보인다. 위의 Time to failure 관계식과 γ 관계식을 동시에 고려하면 activation energy 에 대한 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$Q_{eff} = Q - p_{eff} E_{oxide}$$

SiO_2 의 activation energy 는 실험조건에 따라 다르게 나타나지만, 약 40 Å 이상의 105 °C 실험 조건하에서 10 MV/cm 이상에서는 0.5 eV, 10 MV/cm 미만의 조건에서는 0.5eV 의 경향을 보였다.

2.2. 외재적 절연파괴

구리가 배선에 사용됨으로 인해, 구리의 확산이 문제가 되었다. 다마신 배선공정 도입 초기에는 공정의 미성숙으로 구리배선의 주요 파괴기구는 구리 이동 때문이라고 알려져 왔다. 구리이동을 기반으로한 다양한 파괴모델이 제안되어 왔지만, 정확한 파괴메커니즘을 설명해주는 모델은 아직도 명확하지 않은 상황이다. 이는 다마신 공정 제작 능력과 상관성이 있는 것으로 판단된다. 이번 도입부에서는 외재적 절연 파괴모델을 간단히 소개하고 2.2.1.에서 구리 이동이론에 대해 자세히 리뷰하도록 한다.

처음 제안된 모델은 구리의 이동에 의한 E-model 이다. 구리이동은 농도차이에 의한 확산과 전계에 의한 이동으로 나뉘질 수 있는데, 실제적으로 이동이 주요한 원인인 것으로 알려져 있다. 구리 이동에

대한 자세한 설명은 2.2.1.에서 언급하도록 한다. 이외에도 구리이동이 가장 취약한 capping layer 계면에서의 거동을 분석한 $E^{1/2}$ -model 이 있는데 이는 두 가지 model 이 있다. 첫 번째로 Suzumura et. al., 은 절연체의 conduction mechanism 이 Poole-Frenkel 을 따른다고 하고, 구리이온이 capping layer 계면을 따라 이동하면서 + charge sheet 를 형성하여 절연파괴가 일어난다고 하였다.[8] 두 번째로 Chen et. al.,은 절연체의 conduction mechanism 이 schottky 를 따른다고 하고 전자가 anode 에 도달했을 때, 구리이온이 형성되며 +극성을 가진 구리이온이 cathode 로 이동하면서 전자를 만나 중성화가 되어 metallic filament 를 형성하거나, 또는 절연체 내에서 Cu 가 이동하면서 Cu 의 크기로 인해 절연체가 stress 를 받아 절연 bonding 이 끊어지고 이로 인해 conduction path 가 생성된다고 설명하였다.[9]

현재까지 구리배선에서 외재적 모델은 구리 이동을 기반으로 하여 E-model, $E^{1/2}$ -model 외에도 $1/E$, E^2 등 다양한 모델이 제안되어 왔지만, 아직까지 정확한 파괴기구는 규명되지 않았다.

2.2.1. 외재적 E-model

이번 절에서는 구리배선의 외재적 절연파괴의 대표적인 model 인 E-model 에 대해 설명하고자 한다. Wen Wu et al.은 논문에서 구리배선의 절연파괴 단계를 다음과 같이 설명하였다. 구리가 이온화되면서 절연체 내부로 이동하고 전계에 의해서 구리이온이 cathode 방향으로 이동하면서 anode 쪽에 쌓여 leakage current 가 증가하면서 절연파괴에 이른다고 하였다.[10]

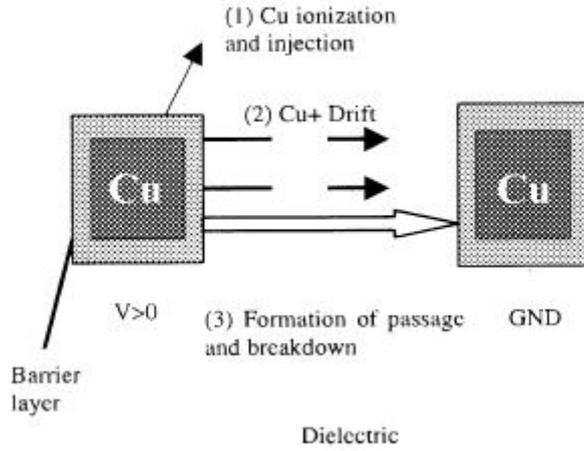


Figure 2-4 Illustration of TDDB degradation steps

구리이온이 절연체 내부로의 이동은 가해진 전기장의 driving force 에 의해 이루어지게 된다. 이를 모델링 하기 위해 1-D 이동 모델을 아래와 같이 고려한다.

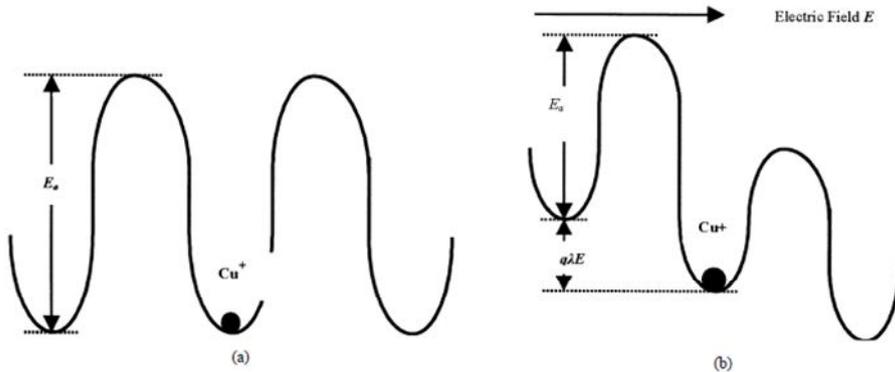


Figure 2-5 (a) Cu^+ in periodic potential well without stress (b) Cu^+ in periodic potential well under an electric field

외부 전기장이 인가되지 않았을 때, 구리 이온이 좌측이나 우측으로 이동될 수 있는 확률은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Gamma = A \exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right)$$

만약 전기장(E)이 인가된 (b)의 경우를 고려해 보면, barrier 높이가 $q\lambda E$ (q: charge of ion, λ : distance of available position, E: electric field)만큼 좌우로 달라지게 되어, 좌측으로 넘어갈 수 있는 확률 Γ_- , 우측으로 넘어갈 수 있는 확률 Γ_+ 은 아래와 같이 표현된다.

$$\Gamma_- = A \exp\left(-\frac{E_a + q\lambda E}{k_b T}\right), \quad \Gamma_+ = A \exp\left(-\frac{E_a - q\lambda E}{k_b T}\right)$$

이에 전기장의 방향으로 이동하는 구리이온의 확률은 다음과 같이 계산된다.

$$\Gamma_+ - \Gamma_- = A \exp\left(-\frac{E_a}{k_b T}\right) \left[\exp\left(\frac{q\lambda E}{k_b T}\right) - \exp\left(-\frac{q\lambda E}{k_b T}\right) \right]$$

구리 이온이 이동하는 flux 를 수식화 하기 위해 다음과 같은 두 위치를 가진 1D model 을 생각한다.

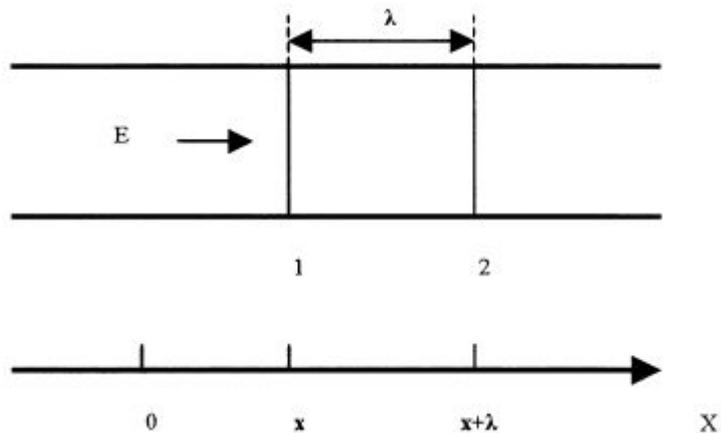


Figure 2-6 1-D copper ion diffusion illustration

Figure 2-6 과 같이 electric field 가 가해졌을 때 1 위치에서 2 위치로 이동하는 구리 이온은 확산에 의한 이동과, 앞에서 언급한 전기장에 의한 이동의 합으로 표현될 수 있다. 하지만 구리배선의 절연 파괴에 미치는 주된 영향은 확산보다는 전계에 의한 구리이온의 이동이라고 주장하면서, 시간에 따른 구리이온의 flux 를 다음과 같은 수식으로 표현하였다.

$$J(x,t) = J_{Drift}(x,t) = C(x + \lambda, t)(\Gamma_+ - \Gamma_-)\lambda$$

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = \lambda \left[\exp\left(-\frac{E_a - q\lambda E}{k_b T}\right) - \exp\left(-\frac{E_a + q\lambda E}{k_b T}\right) \right] \frac{\partial C(x,t)}{\partial x}$$

절연파괴가 일어나기 위해서는 anode 에서 cathode 사이에 구리 이온이 들어차야 절연파괴가 일어난다. 이 시점은 상기 수식의 계수에 비례하게 된다. 절연파괴가 일어나는 시점을 τ_{BD} 라고 표현하고 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_{BD} = \frac{B \exp\left(\frac{E_a}{k_b T}\right)}{\exp\left(\frac{q\lambda E}{k_b T}\right) - \exp\left(-\frac{q\lambda E}{k_b T}\right)}$$

비교적 높은 전계가 인가되었을 때에는 $\exp\left(\frac{q\lambda E}{k_b T}\right) \gg \exp\left(-\frac{q\lambda E}{k_b T}\right)$

이므로 다음과 같이 수식이 단순화 될 수 있다.

$$\tau_{BD} = B \exp\left(\frac{E_a - q\lambda E}{k_B T}\right)$$

위는 외재적 절연파괴기구의 대표적인 E-model 을 나타낸다.

2.3. 절연파괴 메커니즘 분석 방법

구리배선의 신뢰성을 정확히 예측하기 위해서는 파괴메커니즘의 정확한 분석이 필수적이다. 2.1.과 2.2.에서 언급했듯이 구리배선에서는 내재적과 외재적이 공존할 수 있으므로 어느 인자가 우선하여 파괴가 되었는지를 알아야 한다. 실제 구리배선의 절연파괴가 일어난 지점을 정확히 찾아내기가 어렵고, 찾아내었다 하더라도 그 원인이 내재적인지 외재적인지 판단하기가 어려운 상황이다. 이에 이번 장에서는 다양한 파괴분석 방법과 그 이론을 소개하고자 한다.

2.3.1. Conduction mechanism 분석

지금까지 내재적 절연파괴와 외재적 절연파괴의 구분을 지을 수 있는 가장 대표적인 방법으로 conduction mechanism 분석 방법이 있다. Figure 2-7 (a)에서 보이듯이 내재적 파괴기구에서는 TDDB 실험 진행시 누설전류의 변화에서 점진적 증가가 보이지 않고, 순간적으로 conduction path 가 형성되는 경향이지만, 구리이온이 절연체 내부로 들어간 경우에는 구리이온이 절연체 내에서 trap site 로 작용하여 누설전류가 점진적으로 증가하는 구간이 보여왔다.

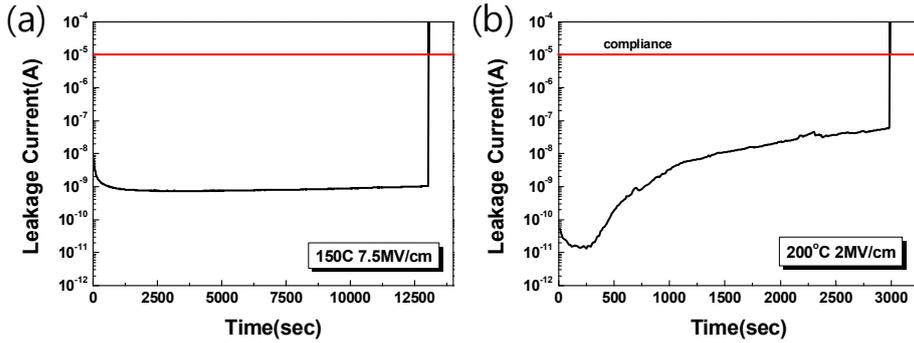


Figure 2-7 (a) Leakage current of Al/SiO₂/Si MOS structure TDDDB test (b) Leakage current of Cu/SiO₂/Si

이외에도 voltage ramping dielectric breakdown(VRDB) test 를 통해 절연파괴가 일어나는 구간까지의 누설전류 변화를 통해 conduction mechanism 을 분석하는 방법이 있다. 절연체를 통한 전류는 다음과 같은 mechanism 으로 설명될 수 있다. Interface limited conduction 인 schottky 와 fowler-nordheim conduction, bulk limited conduction 인 poole-frenkel conduction 이 있다. 이런 conduction mechanism 은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$J_{Schottky} \propto T^2 \exp\left(-\frac{\Phi_{sc} - \beta_{sc}\sqrt{E}}{k_b T}\right), \beta_{sc} = \left(\frac{q^3}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}\right)^{1/2}$$

$$J_{Fowler-Nordheim} \propto E^2 \exp\left(-\frac{\gamma}{E}\right), \gamma = \frac{8\pi(2m^*)^{1/2}(q\phi_B)^{3/2}}{3qh}$$

$$J_{Poole-Frenkel} \propto E \exp\left(-\frac{q\phi_{PF} - \beta_{PF}\sqrt{E}}{2k_b T}\right)$$

전계와 누설전류의 상관관계에서 기울기를 통해 유전율을 얻을 수 있으며, 이 유전율의 값이 쓰여진 절연체와 얼마나 일치하는지를 확인하는 과정으로 적합성을 알 수 있게 된다.

Cu/SiO₂/Si 구조의 시편을 가지고, bias temperature stress(BTS)를 인가한 후 VRDB 실험을 통해 아래와 같이 conduction mechanism 의 변화를 확인할 수 있다.[11]

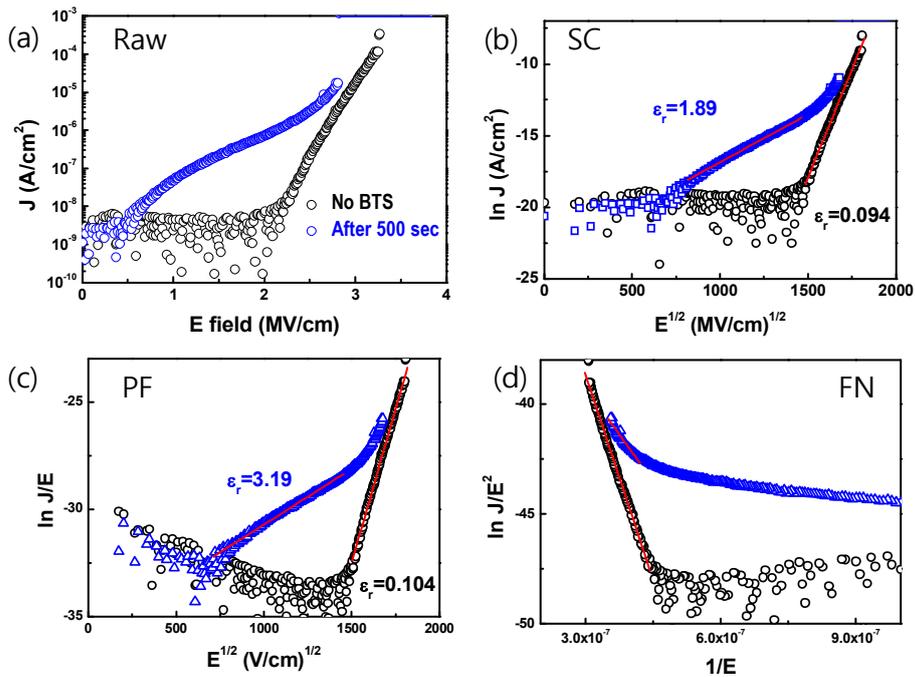


Figure 2-8 leakage current of Cu/SiO₂/Si VRDB (a) Raw data of leakage current before BTS and after BTS, (b) Schottky fitting and permittivity (c) Poole frankel fitting and permittivity (d) Fowler nordheim fitting, Poole frenkel fitting is resonable because of relative permittivity 3.19 (SiO₂ 3.9)

Figure 2-8 의 결과에서 보듯이 BTS 전에는 특정 conduction mechanism 에 fitting 되지 않았던 구간이, BTS 후에 PF conduction

mechanism 에 fitting 됨을 확인할 수 있었고, 이는 절연체 내부로 Cu가 이동하여 trap site 를 생성하였다고 주장하였다.

하지만, 이는 barrier 가 없는 구조에서의 평가 결과이고, 최근의 연구사례들을 보면 구리배선을 사용함에도 불구하고, TDDDB 누설전류의 변화가 없거나, conduction mechanism 의 변동이 없는 경우가 보고되고 있다. Barrier 나 capping layer 공정능력이 향상되면서, 구리가 절연체 내부로 들어가는 정도가 미세해지거나, 없어지는 현상도 고민할 필요가 있게 된 것이다.

2.3.2. Temperature coefficient resistance(TCR) 분석

절연파괴가 일어난 이후, 온도에 따른 저항 변화를 측정함으로써, 절연 파괴의 원인을 짐작할 수 있다. 이는 최근 resistive random access memory 에서 제안된 방법으로, 만약 metallic filament 가 형성되었다면, 양의 TCR 을, oxide vacancy 에 의한 filament 가 형성되었다면 음의 TCR 을 보인다고 주장하였다.

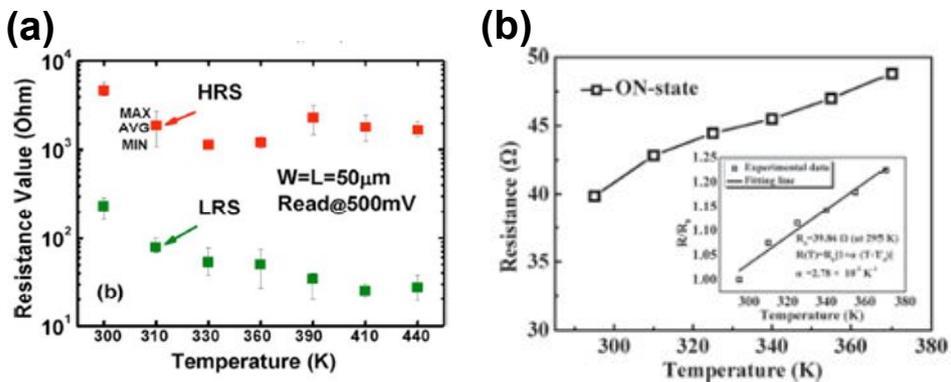


Figure 2-9 Temperature-resistance relation of conducting filament of RRAM
(a) TiN/ZrO₂/Pt (b)

Figure 2-9 (a)는 TiN/ZrO₂/Pt 의 구조를 가지고 있는 저항변화메모리에서의 온도변화에 따른 저항변화를 나타낸 그래프이다. 온도의 증가에 따라 저항 감소현상을 확인할 수 있는데, 이는 반도체물질의 전기적 특성으로 절연체가 반도체화 되었음을 의미한다. ZrO₂ 의 결합 파괴에 의해 생성된 oxygen vacancy trap 에 의해서 전도한다고 주장하였다.[12] 반면 Cu/ZrO₂/Pt 구조의 메모리 경우 Figure 2-9 (b)에 보다시피 온도 증가에 따라 저항이 증가하는 경향을 보인다. 온도 증가에 따라서 저항이 증가하는 성질은 금속의 성질로서 ZrO₂ 내부에 Cu 이온에 의한 금속성을 띠는 필라멘트가 전극을 연결하였다고 판단하였다.[13] Cu-SiO₂ 배선에서도 Cu 이온에 의해 절연체 파괴가 발생하면 전도메커니즘이 금속성을 띠는 것이며, 절연체 물질의 파괴의 경우 반도체 성질을 띠는 것을 추측할 수 있고, 이를 통해서 절연체 파괴 기구를 분석할 수 있을 것이다.

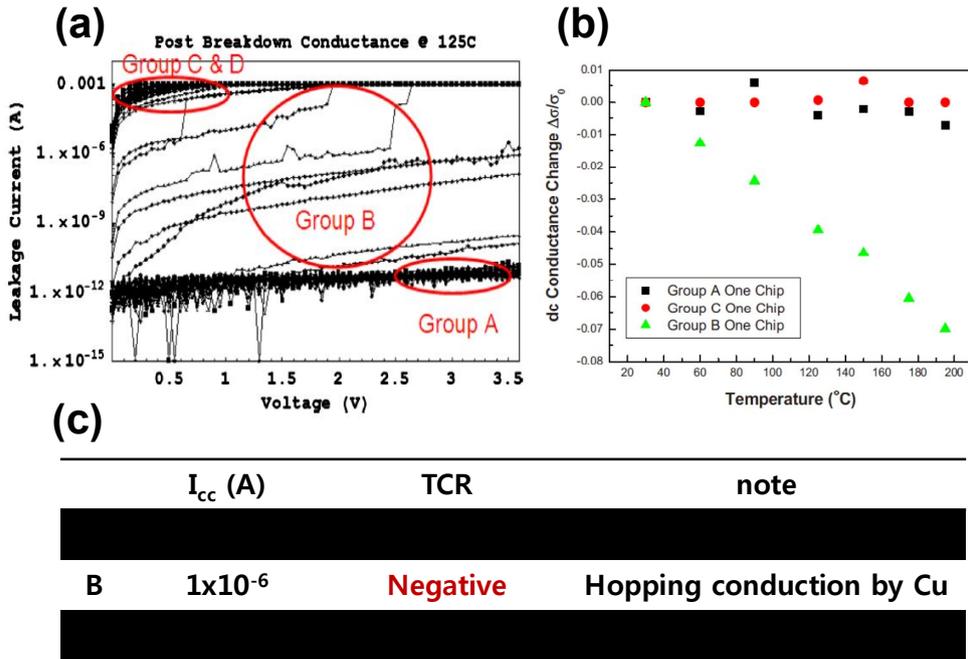


Figure 2-10 Change compliance current was changed as Group A. 5×10^{-8} A, Group B. 1×10^{-6} A Group C. 1×10^{-4} A, Group B sample had negative TCR due to hopping conduction

구리배선에서도 온도에 따른 저항 변화를 관찰함으로써 구리 이온에 의한 절연파괴현상을 확인하였다. Figure 2-10 에서 볼 수 있듯이 구리배선의 절연파괴의 compliance current 를 3 단계로 구분하여 TCR 을 확인한 결과, compliance current 를 1×10^{-6} A 로 설정한 경우 negative 의 TCR 을 보였다. 이는 절연체 내부의 구리이온이 hopping conduction 을 나타낼 수 있는 defect site 가 되었다고 주장하였고, 이보다 높은 compliance current 설정 시에는 물리적 파괴가 일어나 TCR 의 경향을 나타내지 못했다고 하였다.

$$G \propto \exp(-B/T^V)$$

위 수식은 G (conductance)와 온도와의 상관관계를 보인 hopping conduction 의 모델이다. Compliance current 가 1×10^{-6} A 인 group B 에서는 3D system 에서의 $\nu=1/4$ 가 잘 맞는다고 하였고, group B 의 일부 sample 은 온도 승온시 open like 에서 short like 로 바뀌는 현상을 보여주기도 하였다.

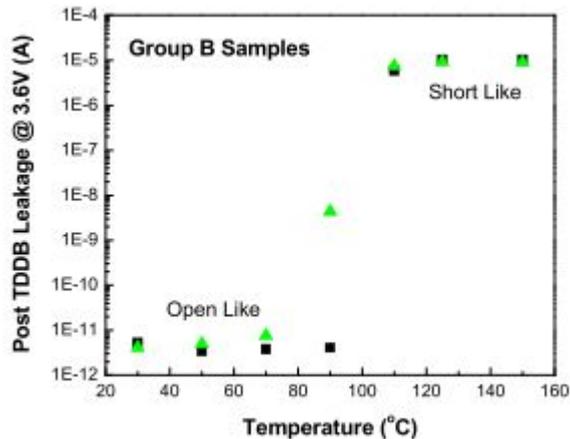


Figure 2-11 group B samples showing a metal-insulator transition at critical temperature

이 논문에서는 구리이온이 절연체에 들어가면서 defect site 를 만들어, 전자가 hopping 할 수 있는 site 가 되며, 이 hopping site 가 충분해진다면, metallic filament 를 형성한다고 주장하였다.[14]

2.3.3. Triangular voltage sweep 분석

마지막으로 절연체 내부의 구리이온을 확인할 수 있는 방법으로 triangular voltage sweep 이 제안되었다. 이 방법은 기존의

MOS 소자에서 절연체 내의 Na^+ 등의 defect ion 을 확인하기 위한 방법으로 주로 쓰였으나, 구리배선 구조에서도 그 방법이 유효하다는 것이 알려져 있다. TVS test 진행시 누설전류는 다음과 같이 표현된다.

$$I_{TVS} = C \frac{\partial V}{\partial t} + I_M + I_L$$

TVS test 에서 누설전류는 저주파수의 capacitance(C) 그리고 sweep rate (dV/dt), mobile ion 이 current peak 를 일으키는 요소(I_M) 그리고 절연체 자체의 leakage current 의 합이다.

높은 온도에서 TVS test 를 진행할 경우 절연체 내부의 구리이온이 activation 하게 됨으로, I_M 에 의해 누설전류의 peak 가 존재하게 된다.

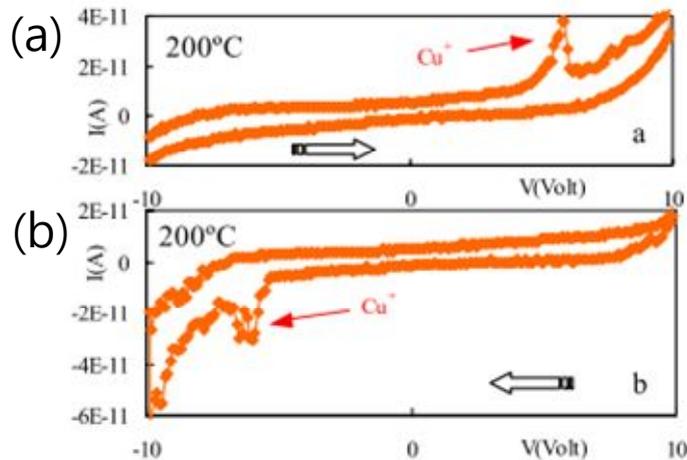


Figure 2-12 Subsequent TVS traces measured at 200°C after 10 min BTS at (a) -0.8 MV/cm (b) 0.8 MV/cm

Figure 2-12 의 결과에서 보듯이, TVS test 를 통하여 BTS 실험 이후 절연체 내부의 Cu 이온을 detect 할 수 있으며, 10^{10} ions/cm² 까지 검출할 수 있는 것으로 알려져있다.[15]

2.4. 동적인 전기장에 의한 구리배선 절연파괴 선행연구

서론에서 언급한 동적인 전기장에 의한 절연파괴를 예측하기 위해 지금까지 구리배선에서 다양한 조건의 연구가 진행되어 왔다. 하지만 Table 2-2 에서 보듯이 동적인 전기장의 종류에 따라 그 수명시간이 다르게 측정되었고 주장하는 파괴메커니즘도 연구에 따라 다르다.[9, 11, 16-18]

Table 2-2 Cu interconnect TTF tendency under dynamic electric field of previous research

Interconnect structure	Frequency(Hz)	Time to failure tendency	Frequency dependence	Dominant mechanism
Cu/Ta-TaN/SiOC	10^{-1}	Uni>DC>Bi	-	
Cu/Ta-TaN/k-2.5	$10^{-2} \sim 10^5$	Uni~Bi~DC	Independent	Intrinsic breakdown
Cu/Ta-TaN/SiCOH	$10^1 \sim 10^5$	Uni~Bi~DC	Independent	
Cu/Ta-TaN/SiCOH	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	Bi>Uni~DC	Independent for Uni Dependent for Bi	Extrinsic breakdown
Cu/SiO ₂ MOS	10^{-3}	Bi>DC	Dependent for Bi	

외재적의 주요한 경우는 절연체 내부에 양이온으로 존재하는 구리가 전기장의 방향의 변화에 따라 이동 방향이 달라지고, 특히 이극성 펄스에 의한 전기장을 가했을 때 절연체 내부로 이동하는 구리가 다시 구리 배선으로 이동하는 현상이 발생한다. 이로 인해서 구리 오염에 의한 절연체 파괴현상이 억제되게 되며 이로 인해 이극성 전기장에서의 수명이 가장 길게 된다.

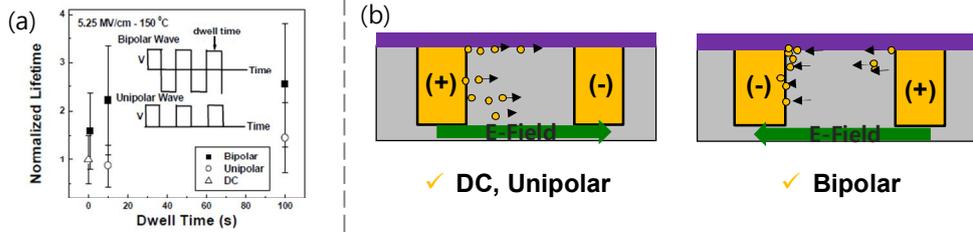


Figure 2-13 (a) Lifetime to the function of dwell time, TTF_{Bi} had the longest TTF, (b) Cu ion migration is retarded under bipolar condition

하지만 Cu 배선의 확산방지막 및 캐핑층의 기술이 발전하여 전기장에 의한 Cu 이동이 억제되는 상황에서는 동적인 전기장에 의한 절연체 고유의 파괴현상이 배선의 신뢰성에 가장 큰 이슈가 될 것이다. 최근 Cu low-k 배선분야에서는 Cu 이동에 대한 영향이 거의 없는 TDDB 샘플에서 단극성 및 이극성 전기장을 인가하여, 수명을 예측하는 연구가 진행되고 있다.

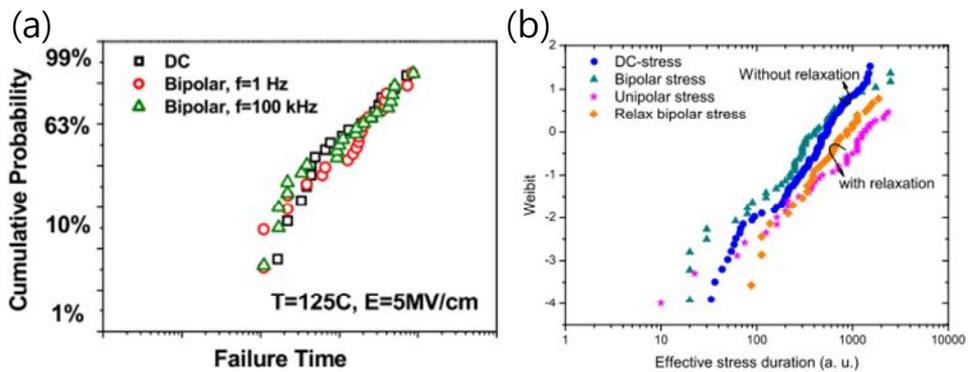


Figure 2-14 (a),(b) TTF_{DC} is similar with TTF_{Bi} at Cu/low-k interconnect

동적인 전기장에서의 내재적 절연파괴의 특징은 이극성 전기장의 수명시간과 DC 의 수명시간이 유사하다는 점이다. 선행연구에서는 주파수의 의존성은 없었으며, 전기장이 인가되었을 때 trap 이 생성되고,

전기장이 인가되지 않는 구간에서만 de-trap 이 발생하는 이유로 DC 와 이극성 전기장의 수명시간이 차이가 없다고 설명하였다.

이와 같이 구리배선에서의 다양한 수명결과를 바탕으로, Cu-SiO₂ 기반의 메모리소자 배선에서 동적인 전기장에 의한 SiO₂ 의 절연파괴 메커니즘을 확실히 규명하고, Cu/low-k 배선에서 동적인 전기장에 의한 절연체 파괴 결과도 설명할 수 있는 절연체 파괴 수명모델을 개발할 필요가 있다.

3. 실험방법

3.1. 절연파괴 시료 제작 및 구조

본 연구에서 이용된 구리배선은 27 nm NAND flash 메모리 공정에서 제작되었다. 현재까지 메모리에서는 logic 소자 대비 RC-delay 성능이 주요하지 않으므로, 절연체는 low-k 가 사용되지 않고 SiO_2 를 사용하고 있으며, 구리배선을 사용하고 있다. 절연파괴 실험의 구조는 comb-serpentine 구조를 사용하였으며, barrier 는 Ta-TaN 을 capping layer 는 SiN 을 사용하였다. 구리 배선사이 절연체 두께는 100 nm 이며, 그 구조는 Figure 3-1 과 같다.

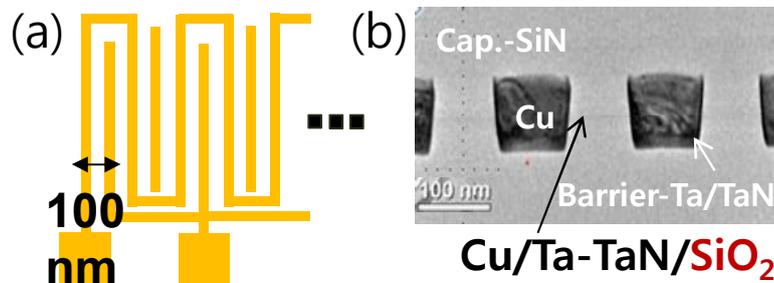


Figure 3-1 (a) Comb-serpentine structure (b) TEM image of test sample

3.2. TDDB실험 장비 및 방법

TDDB 의 통계 실험을 하기 위해서는 동시에 여러 실험 샘플에 BTS 를 인가할 수 있는 시스템을 갖추어야 한다. 이번 실험에서 사용된 장비는 Qualitau 사의 ACE TDDB 장비이다. 이 장비는 package level 의 TDDB 실험이 가능하며, 현재 16 개의 개별오븐을

가지고 있다. 각 개별 오븐별로 다른 온도로 승온이 가능하며, 또한 최대 100 V 까지 전기장을 인가할 수 있다. 또한 모듈별로 동적인 전기장 적용이 가능하며 가능 주파수는 1 Hz 부터 100 kHz 까지 1/32~31/32 duty cycle 로 인가할 수 있다.



Figure 3-2 Configuration of Qualitau ACE TDDB

TDDB 실험에서는 compliance current (I_{CC})를 설정하여 해당 I_{CC} 에 누설전류가 도달했을 시점을 TTF 로 정의하였다. 또한 동적인 단극성 전기장이 인가되었을 때에는 전기장이 인가된 시점만을 TTF 로 계산하였다.

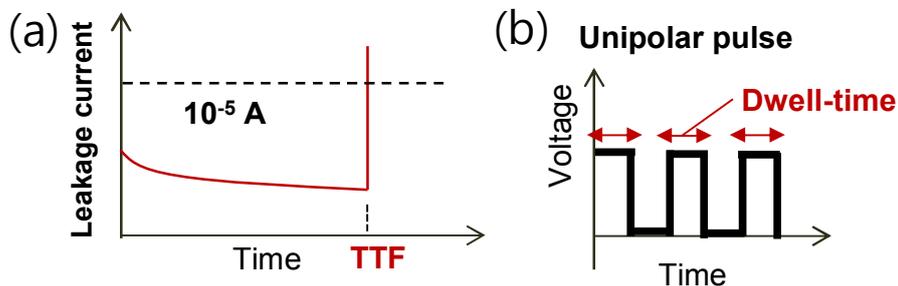


Figure 3-3 (a) Definition of TTF & compliance current (b) Calculation of TTF under unipolar condition

설비에서 인가할 수 있는 최대 주파수는 스펙상 100 kHz 까지 인가할 수 있다고 되어 있다. 이에 설비에서 인가되는 전기장을 단극성 10 Hz

~ 100 kHz 까지, 이극성 역시 10 Hz ~100 kHz 까지 duty cycle 을 50 %로 고정한 뒤 Agilent infinium 54883D oscilloscope 로 측정하였다.

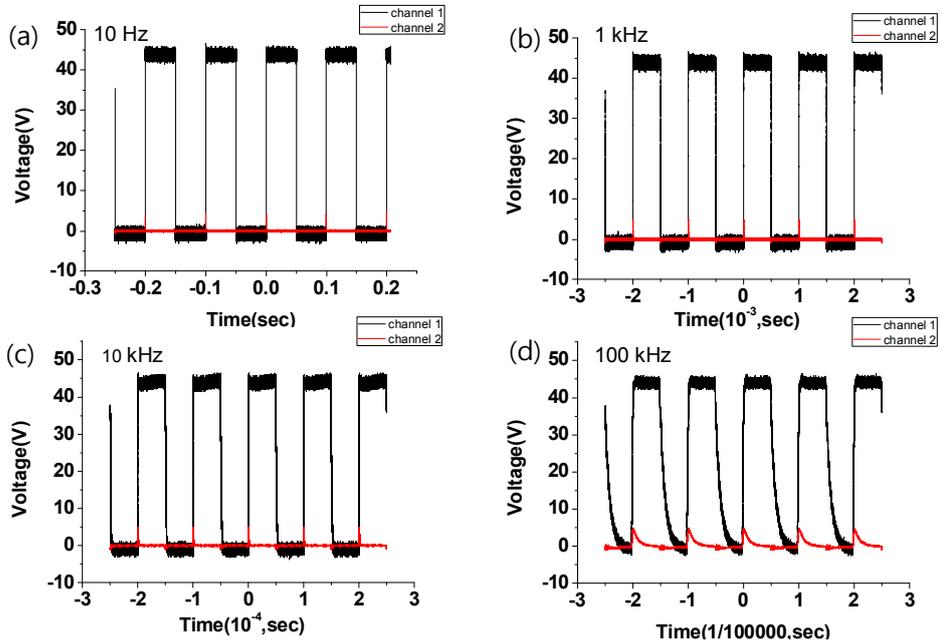


Figure 3-4 Pulse shape of unipolar stress 45V (a) 10 Hz, (b) 1 kHz (c) 10 kHz (d) 100 kHz, Channel 1 is stress Channel 2 is GND.

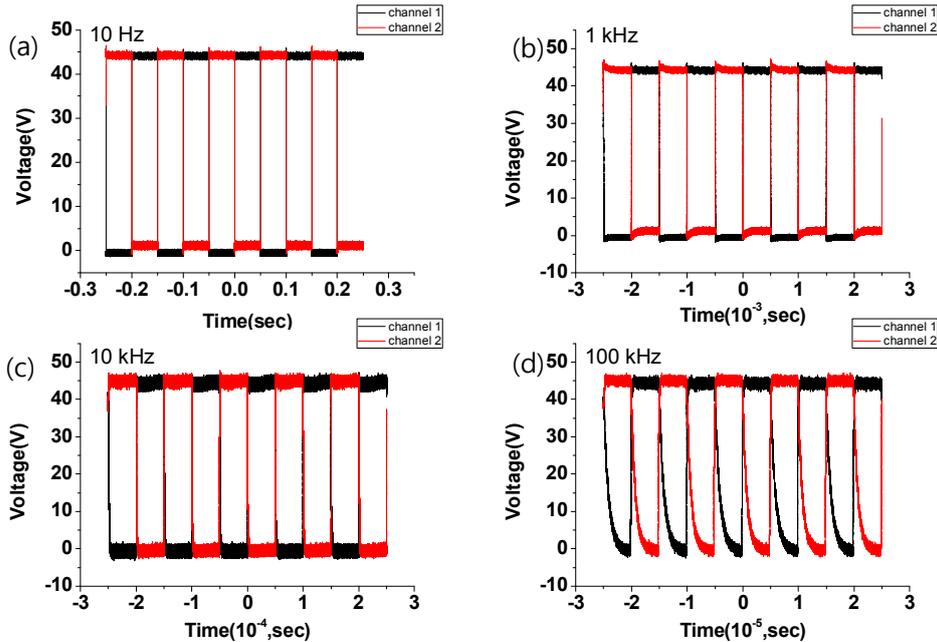


Figure 3-5 Pulse shape of bipolar stress 45V (a) 10 Hz (b) 1 kHz (c) 10 kHz (d) 100 kHz Channel 1 is positive stress, Channel 2 is negative stress

Figure 3-4 에서는 단극성 전기장에서의 pulse 측정결과를, Figure 3-5 에서는 이극성 전기장에서의 pulse 측정결과를 보였다. 100 kHz 의 경우에서 약간의 delay 가 관찰되나, 인가한 전압까지 도달하는 데는 큰 문제가 없는 수준이라 판단된다.

다음으로 누설전류를 측정 시점에 대해 언급할 필요가 있다. TDDB 실험시 설비 spec 상 DC stress 를 인가하게 되면 지속적인 stress 를 인가하면서 누설전류 측정이 가능하지만, 동적인 전기장을 인가하였을 때에는 누설전류를 계속적으로 측정할 수 없으므로, 적당한 sampling 간격과 sensing voltage 를 사용하여 측정하게 된다. 이에 DC, 단극성, 이극성 전기장이 가해질 때에는 매 600 초 간격마다, 1 V 의 sensing voltage 를 인가하여 측정하였다.

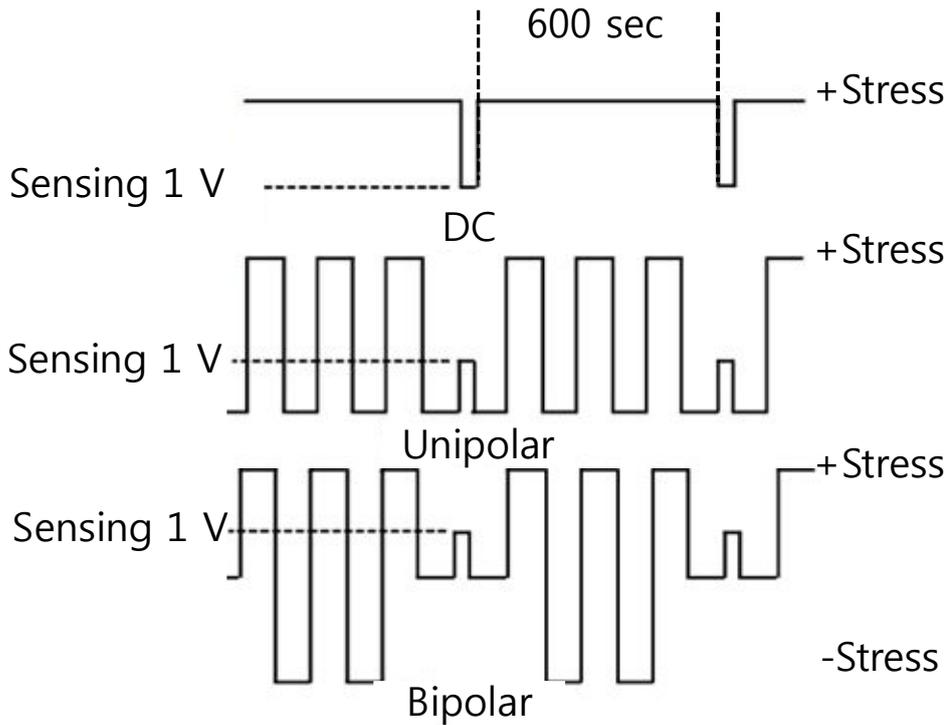


Figure 3-6 Schematic of electric field during DC, unipolar and bipolar TDDB test

3.3. 절연파괴 전기적 특성 분석

절연 파괴 메커니즘을 전기적으로 분석하기 위해, Agilent 4156C precision semiconductor parameter analyzer 를 사용하였다. 실험에 사용된 샘플은 passivation 까지 모두 완료되어 package 되었으므로, 해당 샘플에 정확한 열적 스트레스를 인가하기 위해 probe station 에 다음과 같은 package level heater 를 제작하여 실험하였다.

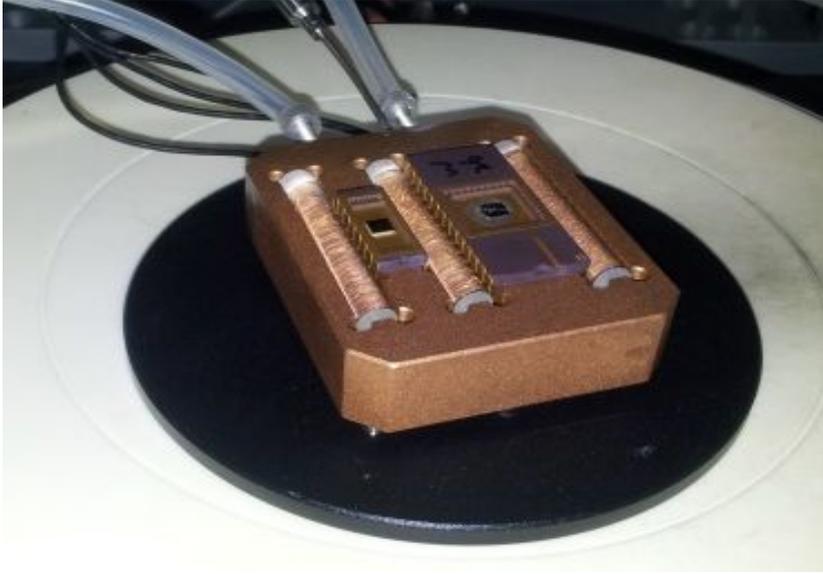


Figure 3-7 Probe station heater for ceramic package

Figure 3-7 에서 보듯이 Al heater 에 의해 발생하는 noise 를 감쇄시키기 위해 접지 처리를 하였으며, probe tip 에 의한 이동을 최소화 하기 위해 vacuum hole 을 제작하여 시료의 이동을 방지하였다. 최대 승온 가능 온도는 320 °C 이며, 온도의 정확성은 ± 0.8 °C 로 정확한 온도에서 실험이 가능하다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1. DC에서의 수명실험 결과

동적인 전기장에서의 TDDB 실험에 앞서, DC 에 대한 실험을 선행하여 진행하였다. 시료에 probe station heater 로 225 °C 를 가하고 agilent 4156C 로 65V 의 stress 를 인가하여 TDDB 실험을 진행한 결과가 Figure 4-1 와 같다.

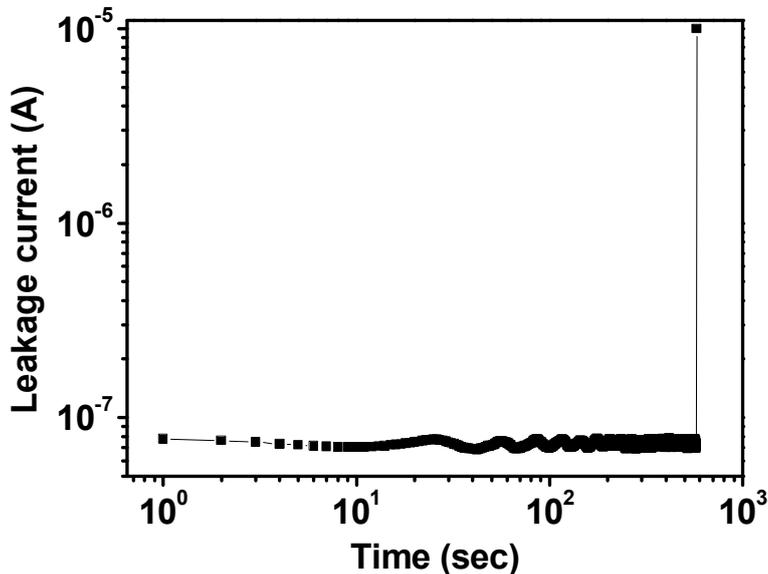


Figure 4-1 Leakage current of TDDB test under 225 °C, 6.5 MV/cm

기존의 barrier 가 없거나, 취약한 구리배선의 절연과피에서 보이는 누설전류의 점진적 증가가 보이지 않아 구리의 절연체의 이동이 제한적임을 예상할 수 있었다. 이에 Qualitau ACE TDDB 장비를 이용하여 225 °C 4.5 ~ 6.5 MV/cm 의 전기장을 인가한 후 TTF 를

측정하고, 기존에 알려져 있던 대표적 내재적 E-model 에 대해 fitting 하였다.

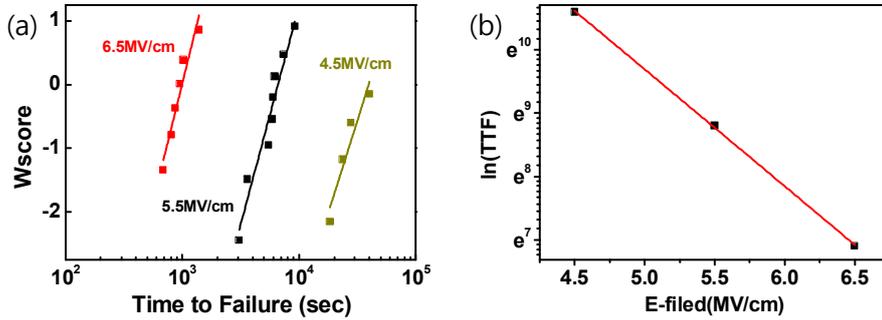


Figure 4-2 (a) Weibull plot of DC TDDDB data under 225 °C 4.5, 5.5, 6.5 MV/cm (b) result of intrinsic/extrinsic E-model fitting

Figure 4-2 (a) 결과에서 보듯이 전기장에 높게 인가될수록 수명시간이 짧아짐을 보이며, 이를 Figure 4-2 (b)와 같이 exponential fitting 을 진행하였을 때 잘 fitting 됨을 확인하였다. 이 기울기를 구하여 2 절에서 언급한 내재적 thermochemical model 의 effective dipole moment (p_{eff}) 와 외재적 E-model 에서의 Cu 이동거리 λ 를 구할 수 있다.

Thermochemical model 을 통한 p_{eff} 는 다음과 같은 수식을 통해 구할 수 있다.

$$Time to Failure = A_0 \exp(-\gamma E_{Oxide}) \exp\left(\frac{Q}{k_b T}\right)$$

$$Q_{eff} = Q - p_{eff} E_{oxide}$$

실험에서 사용된 구리배선의 effective dipole moment 는 7.89 eÅ 이다. 이 값은 SiO₂ 물성 자체의 이론상의 effective dipole moment 값인 7.5 eÅ 의 값과 유사하며, 기존 thermal SiO₂ 내재적

TDDDB 실험 결과인 7~14 eÅ 범위 안에 존재한다. 구리배선 시료에서 사용된 절연체가 PECVD 로 증착된 SiO₂ 임을 고려할 때, thermochemical model 의 fitting 이 실험결과와 잘 일치한다고 볼 수 있다.

하지만, 외재적 E-model 역시 다음과 같은 exponential fitting이 가능하다.

$$\tau_{BD} = B \exp\left(\frac{E_a - q\lambda E}{k_B T}\right)$$

같은 기울기 값으로 구리이온의 이동거리를 계산하였을 때 역시 7.82 Å으로 이는 thermal oxide의 lattice 길이인 5.43 Å 보다 약간 크나, 역시 PECVD로 증착된 SiO₂ 임을 고려하였을 때 외재적 E-model도 역시 잘 일치한다고 볼 수 있다.

Barrier와 capping공정이 성숙된 구리배선의 시료에서는 단순한 DC의 전기장 변화의 실험만으로는 정확한 파괴기구를 구분 짓기가 어렵다. 신뢰성 실험 결과에서 정확한 파괴기구를 분석할 수 있어야, 고신뢰성의 소자를 만들 수 있는 공정개선점을 찾을 수 있을 것이다.

4.2. 동적인 전기장에서의 수명실험 결과

소자에 가해지는 전기장이 단순한 DC만이 아니라 다양한 동적인 전기장이 가해짐에 따라, 정확한 소자의 수명을 예측하기 위해서는 동적인 전기장에 의한 구리배선의 절연파괴 경향을 알 필요가 있다. 또한 동적인 전기장에서의 수명을 파악하면, 구리배선의 절연파괴기구를 유추해 볼 수 있을 것이다. 구리이동이 주요 파괴기구일 경우 이극성 전기장에서의 수명이 가장 길어짐이 과거

연구에서 보여졌고, 내재적의 경우에는 동적인 전기장의 종류에 따른 수명의 큰 차이가 보이지 않았다. 이에 DC TDDB조건 중 6.5 MV/cm에서의 동적인 전기장의 수명시간 특성을 확인해 보았다.

200 °C, 6.5 MV/cm에서의 전기장의 극성에 따른 TDDB실험의 누설전류 변화와 TTF를 구하기 위한 Weibull plot을 Figure 4-3에 나타내었다.

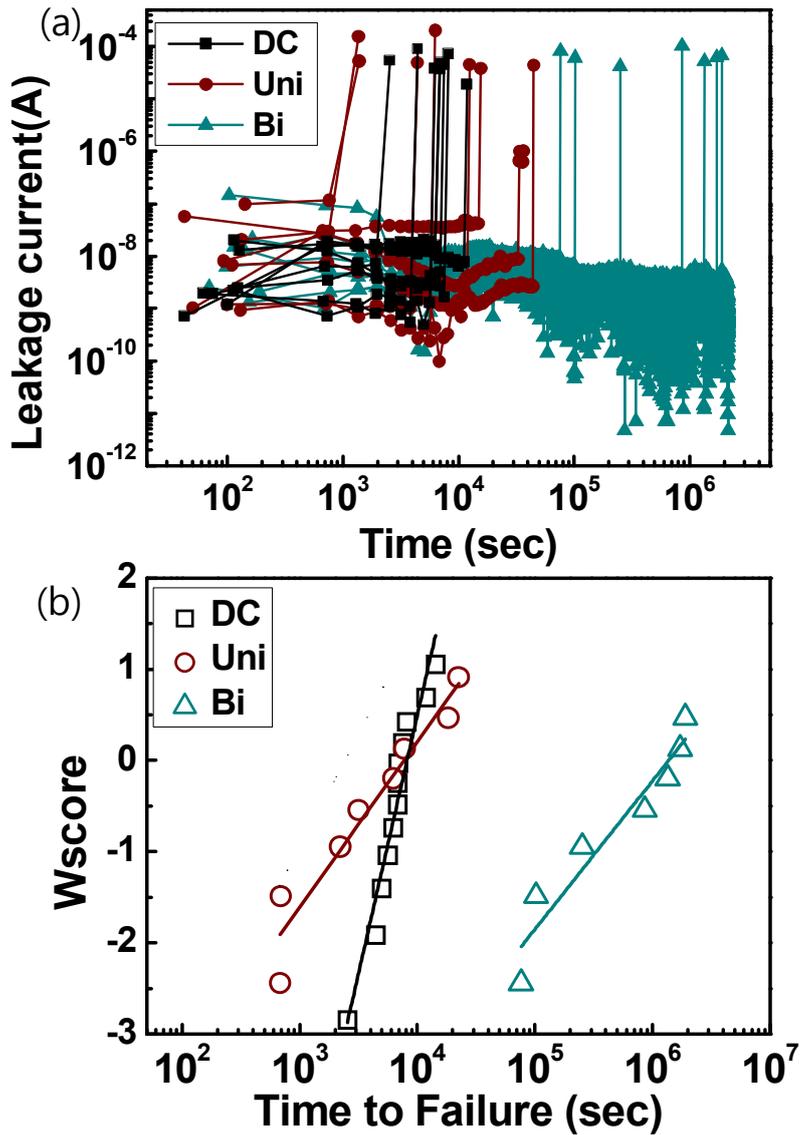


Figure 4-3 (a) Leakage current of DC, unipolar, bipolar, (b) Weibull plot of TTF data

200 °C 6.5 MV/cm의 조건에서 $TTF_{DC} \sim TTF_{Uni} < TTF_{Bi}$ 의 경향을 보였다. 동적인 전기장이 인가되었을 때, Weibull beta값이 낮은 경향을 보였으나, 후속의 다른 조건에서의 결과에서 Weibull beta값의 동적인

전기장에 대한 경향이 보이지 않았기에, 이번 논문에서는 TTF만 고려하여 분석을 진행하였다. 후속예 더 많은 시료를 바탕으로 통계실험을 진행할 때, beta값의 변화를 확인할 예정이다. 구리배선에서 절연체 내부로 구리 이온의 이동이 있을 경우, 온도의 영향이 클 것으로 판단하여 넓은 온도범위(150~225 °C)에서 극성변화에 따른 TTF를 측정하였다.

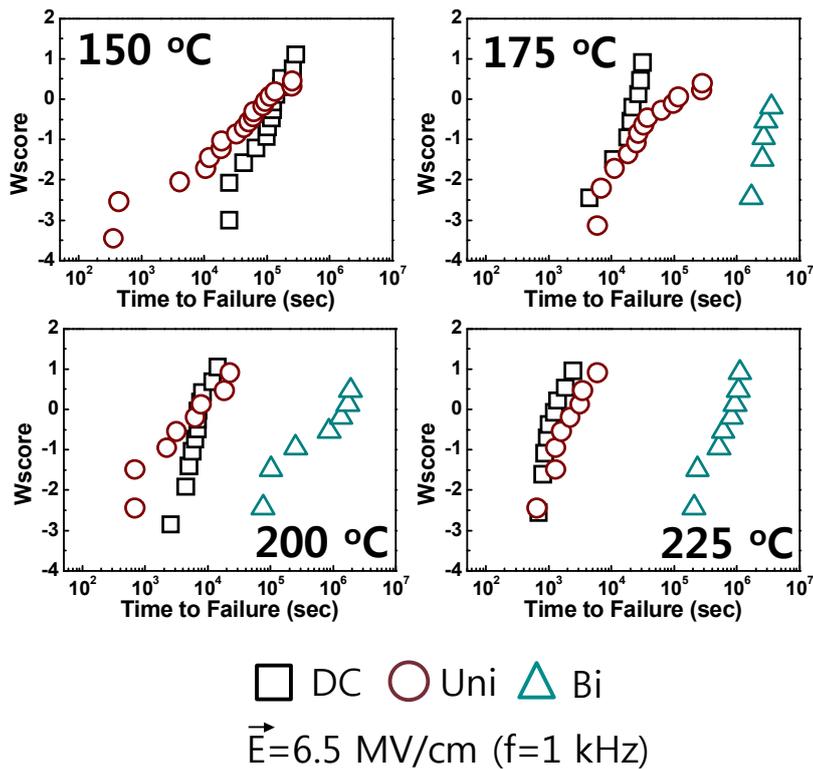
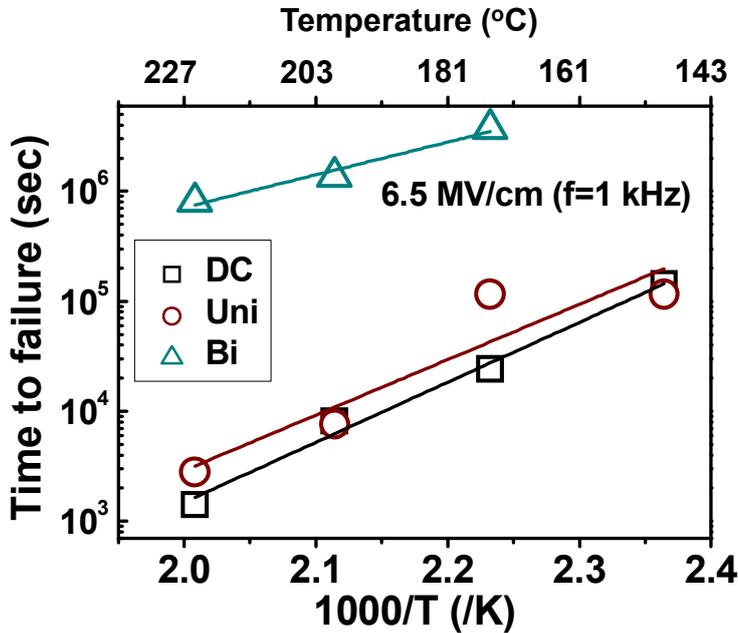


Figure 4-4 Weibull plot of various temperature stress. TTF tendency was not changed with stressing temperature

150°C에서는 이극성 펄스 조건의 TTF가 길어 실험을 완료하지 못했으나, $TTF_{DC} \sim TTF_{Uni}$ 의 경향을 보였으며, 175°C~225°C 6.5 MV/cm, frequency 1 kHz 모든 조건에서 $TTF_{DC} \sim TTF_{Uni} < TTF_{Bi}$

경향은 바뀌지 않았다. 온도에 대한 수명시간을 구했으므로 이를 바탕으로 activation energy를 구할 수 있었다.



$$TTF \propto \exp\left(\frac{E_a}{k_B T}\right)$$

	DC	Uni	Bi
E_a (eV)	1.08	1.00	0.59

Figure 4-5 Arrhenius plot of dynamic electric field TTF to the function of 1/T, E_a of DC is similar with Unipolar, however E_a of bipolar is smaller than DC & unipolar

Figure 4-5에서와 같이 전기장 극성에 따른 activation energy를 도출한 결과, DC와 단극성 조건에서의 activation energy는 1.0 eV 내외로 유사하나, 이극성 전기장의 경우 activation energy가 0.6 eV로 낮은 경향을 보였다. 이극성의 TTF가 DC, 단극성보다 길고, activation energy가 낮은 경향을 보여 Bipolar의 경우 다른 breakdown mechanism을 가지고 있는 것으로 예상하였다.

4.2.1. 전기적 분석 방법을 통한 절연과피 메커니즘 확인

이극성 전기장에서의 수명 증가 현상과, activation energy의 차이가 있는 실험결과를 바탕으로 만약 구리배선의 절연과피가 구리 이온에 의해 영향을 받는다고 가정하였을 때, 이극성 전기장에서는 그 이동이 제한되어 수명이 길어질 것이라 생각했다. 이에 전기적 분석 방법을 통해 절연체 내부의 구리이온을 확인해 보는 실험을 진행하였다.

첫 번째로 진행한 실험은 conduction mechanism의 변화를 관찰하는 것이다. 구리이온이 절연체 내부로 확산하면, 구리이온의 영향에 의해 PF로 conduction mechanism이 변경되는 현상을 보여왔다. 이에 초기상태의 샘플의 VRDB와 200°C DC BTS를 TTF의 50% (3600sec) 인가한 후의 VRDB를 측정 한 뒤 conduction mechanism의 분석을 진행하였다.

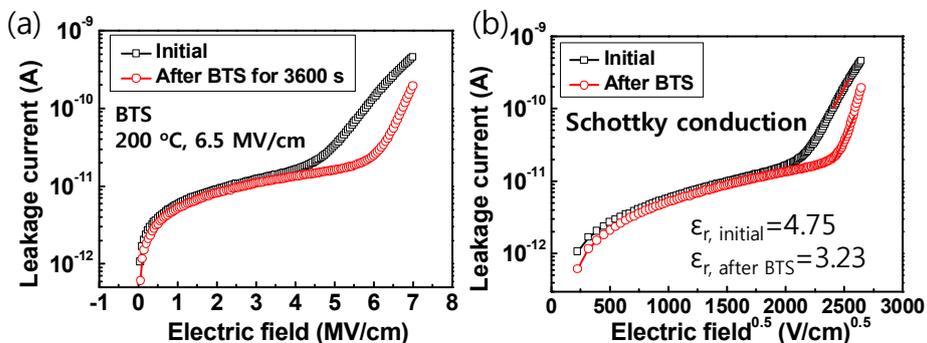


Figure 4-6 (a) VRDB data of initial and after BTS(200 °C, 6.5 MV/cm), (b) Schottky fitting

Figure 4-6 의 VRDB data에서 보듯이 초기상태에서 conduction mechanism이 interface limited인 schottky conduction을 보였다. DC BTS 인가 후에도 역시 그 mechanism은 변경되지 않았다. 이로 미루어보아, 구리 이온이 절연체 내부에 존재하지 않거나, conduction mechanism을 변경시키지 못할 정도로만 존재한다는 것을 추정할 수 있었다.

두 번째로 진행한 방법은 절연파괴 이후의 소자에서 TCR분석을 진행하였다. 절연 파괴가 발생한 시료의 I-V특성을 측정하고 해당 시료에 대해 온도를 승온하면서 저항 변화를 측정하였다. I-V 측정결과 ohmic conduction을 보였으며, 온도에 따른 저항 변화는 Figure 4-7과 같았다.

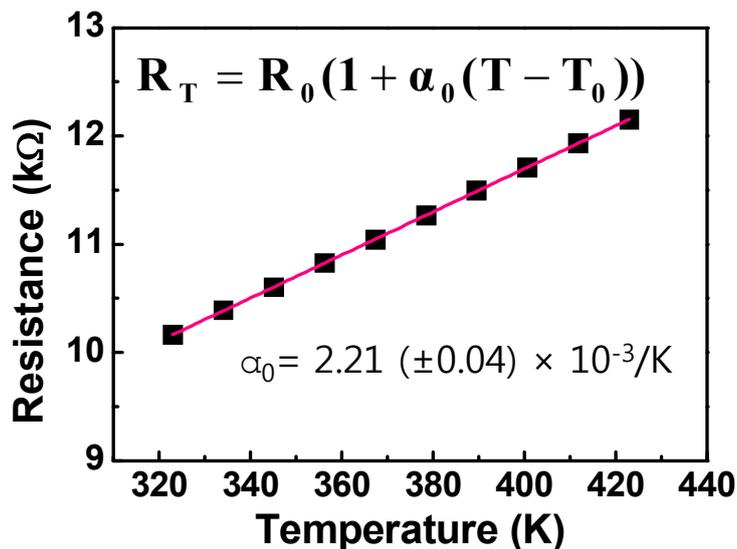


Figure 4-7 Resistance of dielectric broken down sampling to the function of temperature, TCR is around $2.2 \times 10^{-3}/K$ which is similar with cu nanowire TCR of 15nm diameter($2.5 \times 10^{-3}/K$)

절연 파괴 후 TCR 측정결과 모두 양의 값을 보였으며, Cu

nanowire의 TCR과 큰 차이를 보이지 않았다.[19] 이로 미루어 보았을 때, 절연체 내부에 구리로 구성된 conducting path가 생성되었다고 예상할 수 있다.

마지막으로 TVS test를 진행하였다. 초기 상태에서 TVS를 측정하고 DC BTS 이후의 TVS와 이극성 BTS 이후의 TVS를 측정하여 그 결과를 비교했다.

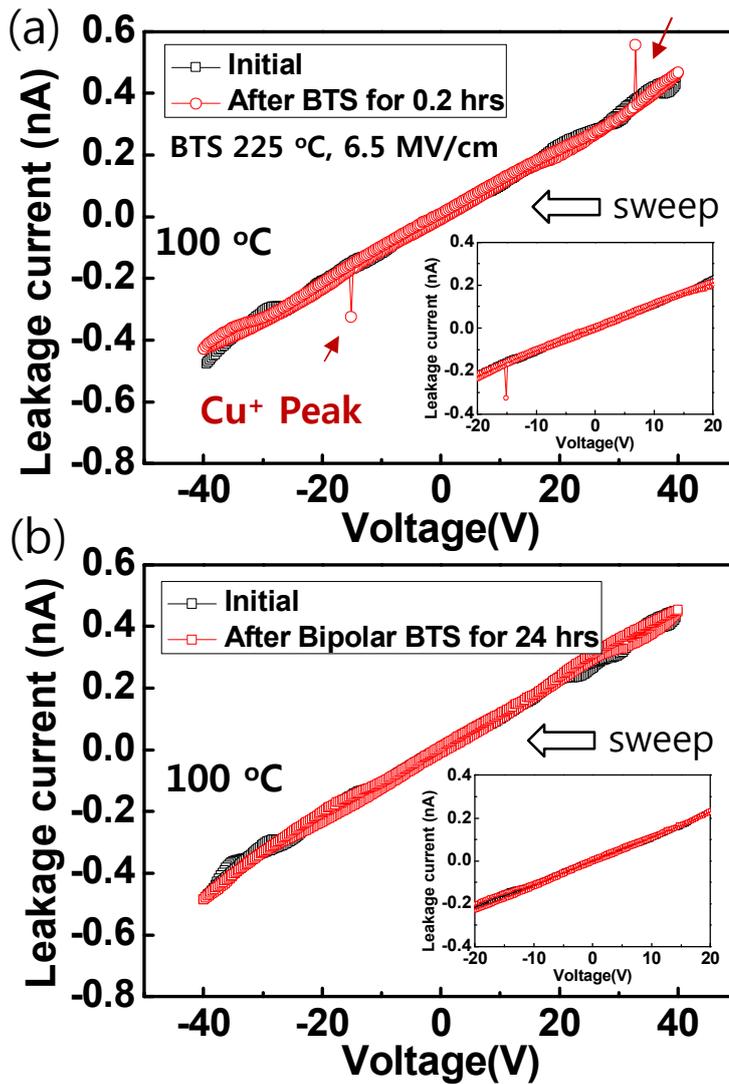


Figure 4-8 Leakage current of TVS (a) initial, DC BTS (b) initial Bipolar BTS, leakage current peak was observed when DB BTS was applied

Figure 4-8의 TVS test 결과 DC BTS 이후에는 누설전류의 peak가 관찰되나, 이극성 BTS 후에는 누설전류의 peak이 관찰되지 않았다. 이로 미루어보아 DC에서는 구리 이온이 절연체 내부로 이동하였고, 이극성의 경우 극성의 변화로 인해 구리 이온의 이동이

제한되어 DC 대비 긴 수명시간을 가지는 것으로 판단할 수 있다.

이극성 조건에서의 낮은 activation energy 및 TCR의 양의 값과, TVS의 누설전류 peak 로 미루어 보았을 때, 이극성의 경우 구리 이온의 이동이 제한되며 구리 이온이 절연파괴에 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

4.3. 단극성 전기장에서의 주파수변경에 따른 절연 파괴수명

지금까지 주파수를 1 kHz로 고정한 상태에서 DC, 단극성, 이극성의 수명시간을 분석하였다. 추가적으로 단극성에서 주파수를 변경하면서 수명시간을 측정하였다. 200 °C 6.5 MV/cm 조건에서 단극성 주파수를 1 ~100 kHz까지 변경한 결과가 Figure 4-9와 같다.

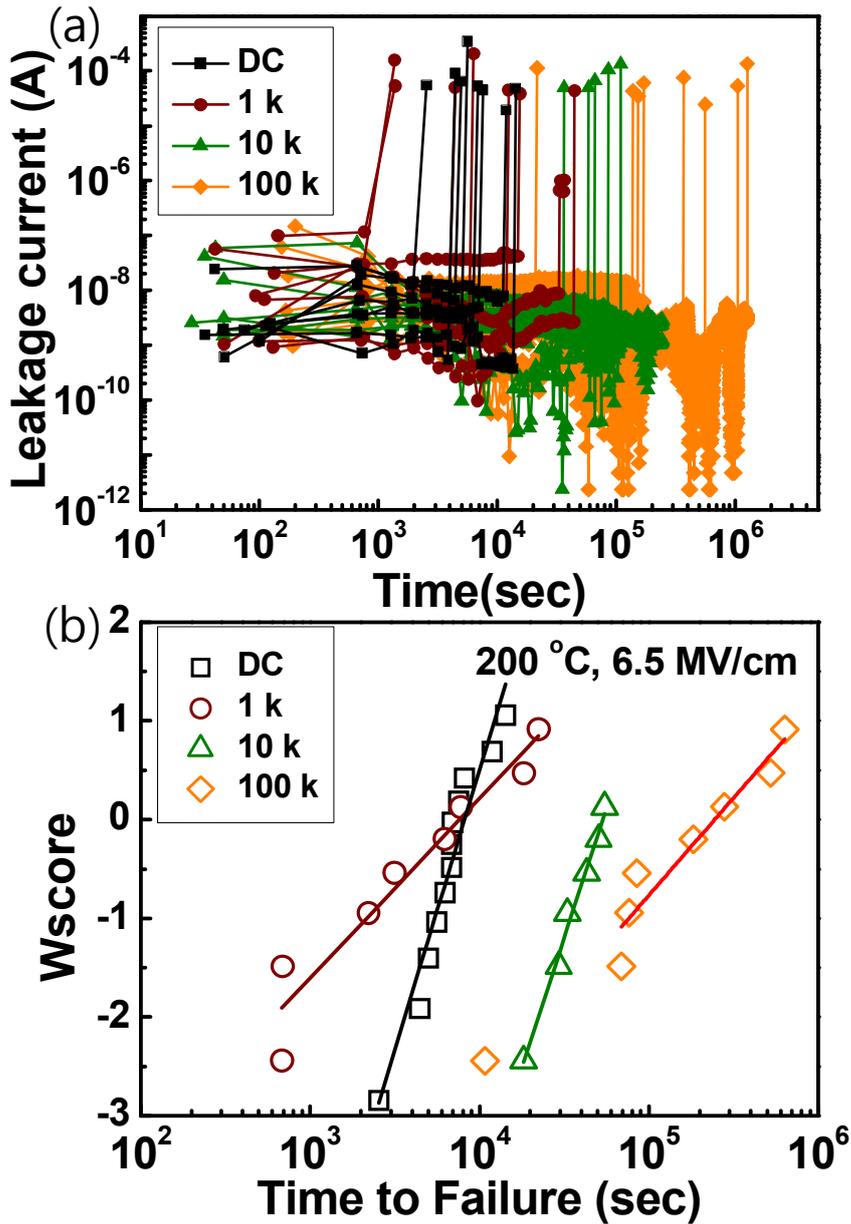


Figure 4-9 (a) Leakage current of DC, unipolar 1 kHz, 10kHz, 100 kHz (b) Weibull plot of TDDDB data, TTF increased as unipolar frequency increased.

단극성 주파수가 증가할수록 수명 시간이 증가함이 확인되었다. 6.5

MV/cm 조건에서 온도를 변경하면서 주파수 변경에 따른 수명시간을 확인한 결과 Figure 4-10과 같았다.

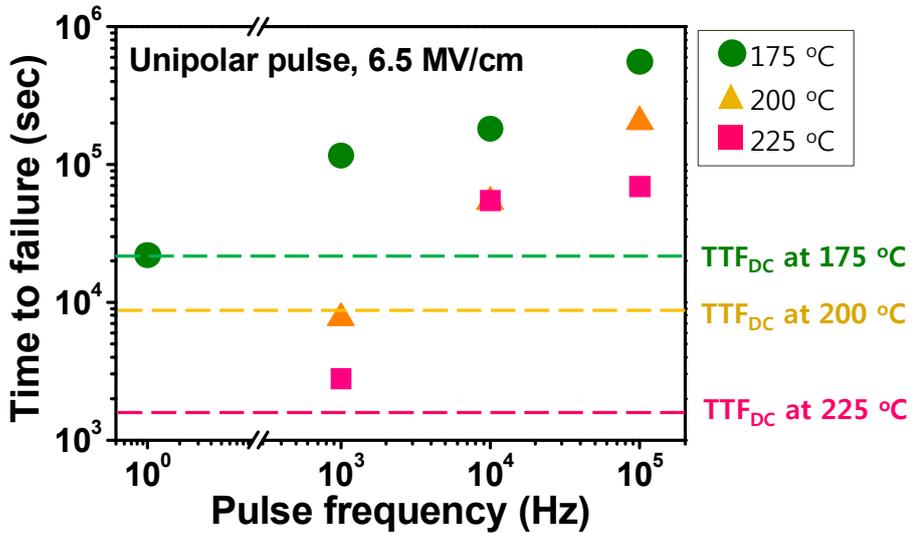


Figure 4-10 TTF to the function of unipolar frequency under 175 °C ~225 °C

175°C~225°C로 온도를 변경하면서 단극성 전기장 주파수에 따른 수명시간을 측정한 결과 모든 온도에서 한계 주파수 이상에서 주파수가 증가할수록 DC수명시간 대비 증가하는 경향을 보였다.

구리 이온은 전기장의 방향에 의해 이동하므로, 동일시간에 이동한 Cu ion의 양은 주파수에 영향을 받지 않을 것이라 생각하고, 주파수가 증가할수록 내부 분자 결합이 끊어질 확률이 적을 것이라 예상했다.

4.3.1. Thermochemical fatigue model

단극성 전기장에서의 한계 주파수 이상에서 주파수 변화에 따른 수명시간의 증가를 설명하기 위해, 절연체 내부의 분자결합이 열적

stress와 전기적 tensile stress에 의해 끊어지는 thermochemical model을 고려하였다. 만약 DC가 아닌 이극성 전기장이 인가된다면, 절연체 내부의 분자결합은 Figure 4-11과 같이 tensile stress과 compressive stress를 반복적으로 받게 될 것이다.

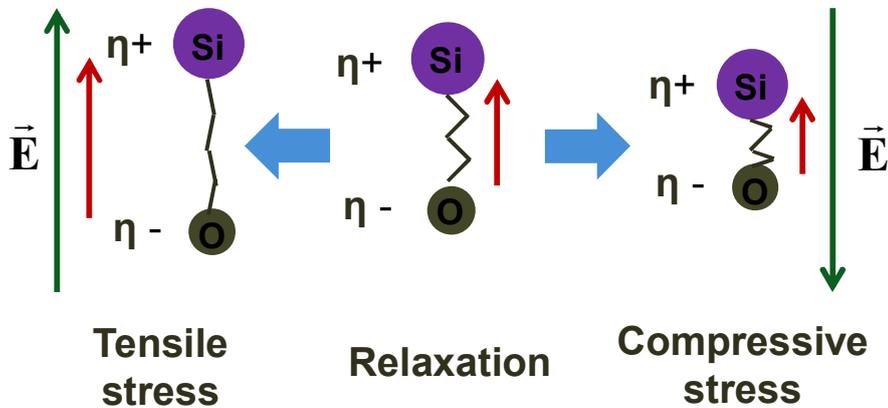


Figure 4-11 Stress is changed due to electric field polarity

만약 단극성 전기장 가해질 경우 분자결합 내에 tensile stress와 relaxation이 반복될 것이다. 본 연구에서는 반복적인 응력에 의한 피로파괴 (fatigue) 개념을 Thermochemical-model에 적용하여 새로운 수명식인 Thermochemical fatigue model을 제안하고자 한다.

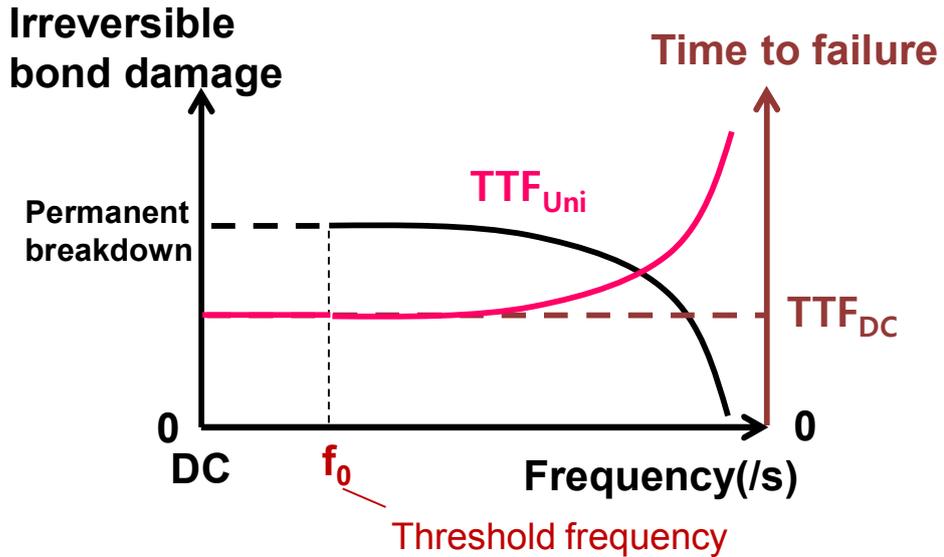


Figure 4-12 Schematic of bond damage and TTF_{Uni} to the function of frequency, Over the threshold frequency bond damage decreased, so TTF_{Uni} increased.

Figure 4-12에 절연체 내부 분자결합의 피로 파괴 개념을 보였다. 단극성 펄스가 f_0 미만일 경우에는 분자결합에 DC 조건과 동일한 손상이 가해진다고 생각하였다. 하지만 f_0 이상의 주파수에서는 relaxation 현상에 의해서 결합의 손상이 회복되고, 주파수가 클수록 손상 정도가 DC 조건에 비해서 작아질 것이라고 생각하였다. 즉, 단극성 펄스 조건에서는 DC 조건보다 절연체의 수명이 증가한다고 생각하였다.

$$i) \quad f < f_0, TTF_{Uni} \sim TTF_{DC}$$

$$ii) \quad f > f_0, TTF_{Uni} \propto \text{frequency}$$

위와 같은 가설 및 6.5 MV/cm 의 단극성 주파수 변경 실험 결과를 바탕으로, DC와 같은 수명시간을 가질 수 있는 한계 주파수 및

주파수에 따른 분자결합의 파괴정도를 나타낼 수 있는 실험식을 도출하고자 하였다.

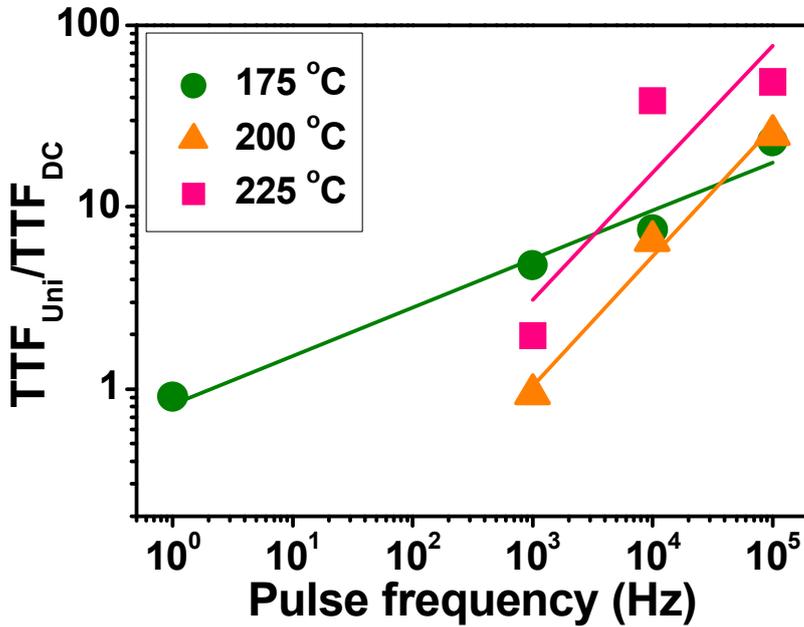


Figure 4-13 Log of relative TTF to the function of Log pulse frequency

Figure 4-13에 log-주파수에 대한 log-relative TTF fitting결과를 보였다. 각 온도별로 linear한 경향을 얻을 수 있었다. 이에 실험식을 다음과 같이 구하였다.

$$TTF_{Unipolar} = (TTF_{DC})(f / f_0)^a$$

여기서 f_0 는 한계 주파수, exponent a 는 TTF에 따른 수명시간의 증가를 나타낸다. 이 실험식을 바탕으로 6.5 MV/cm 에 대한 a 와 f_0 를 구했다.

Table 4-1 Exponent a, threshold f_0 of experiment data

	175 °C	200 °C	225 °C
Exponent a	0.3	0.7	0.7
Threshold frequency f_0	2	950	197

Threshold frequency (f_0)와 exponent a가 의미하는 물리적 의미에 대한 연구는 계속되는 신뢰성 연구를 통해 정립이 필요하다.

다만, 분자 결합에서 주파수에 의한 relaxation을 고려할 때, 100 kHz의 낮은 주파수 영역에서는 stress relaxation을 고려하기 어렵다. 하지만, 실제 소자에서 가해지는 주파수는 더 높을 수 있다는 것을 가정할 때, 구리배선의 절연파괴 모델에서 내재적 요소를 고려할 수 있다는 것을 생각해 볼 수 있다.

4.3.2. 주파수 변경에 따른 구리 이온 이동 속도

4.2. 절에서 설명한 동적인 전기장에서의 수명결과 및 전기적 분석의 결과로 미루어 보았을 때, 구리 이동이 절연파괴의 영향을 미쳤다고 볼 수 있다. 구리이온의 절연체 내부 또는 capping layer계면에서 이동하는 속도는 전기장의 크기에 의해 결정된다. DC가 인가된 경우에서의 구리이온이 일정 속도에 도달하기까지 시간(acceleration time)이 걸린다고 가정할 수 있다. 만약 단극성 전기장이 가해진다면, DC에서의 전기장에 의한 속도에 도달하기 전에 전기장이 가해지지 못함으로 구리이온의 이동거리가 DC대비 짧아질 수 있다고 생각하였다.

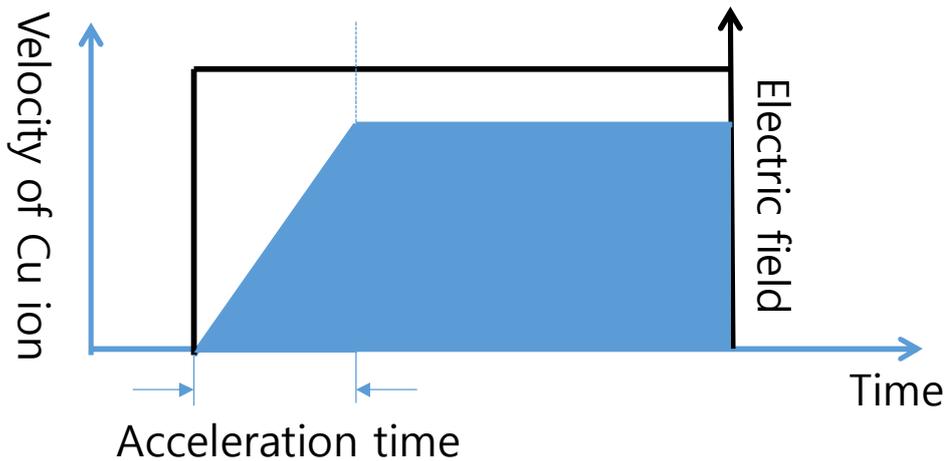


Figure 4-14 When electric field is applied to Cu interconnect dielectric, Cu ion is accelerated with acceleration time.

Figure 4-14 와 같이, 전기장이 가해지는 순간에 구리이온이 가속이 되고, 일정 속도에 도달하는 시간까지 지연이 발생하게 된다. 절연체 내부에서의 이온의 가속도에 대해서는 널리 알려진 바가 없으나, 운동의 법칙을 고려할 때, 이온의 이온속도는 전기장에 의한 등가속도 운동을 한다고 가정하였다.

만약 주파수의 증가에 의해, 전기장이 가해지는 시간이 가속시간과 같아질 때까지는 구리이온의 이동거리는 DC와 동일할 것으로 판단되나, 만약 전기장이 가해지는 시간이 가속시간 대비 짧다면, 동일한 시간에서의 이동거리는 DC대비 짧아질 수 있을 것이다.

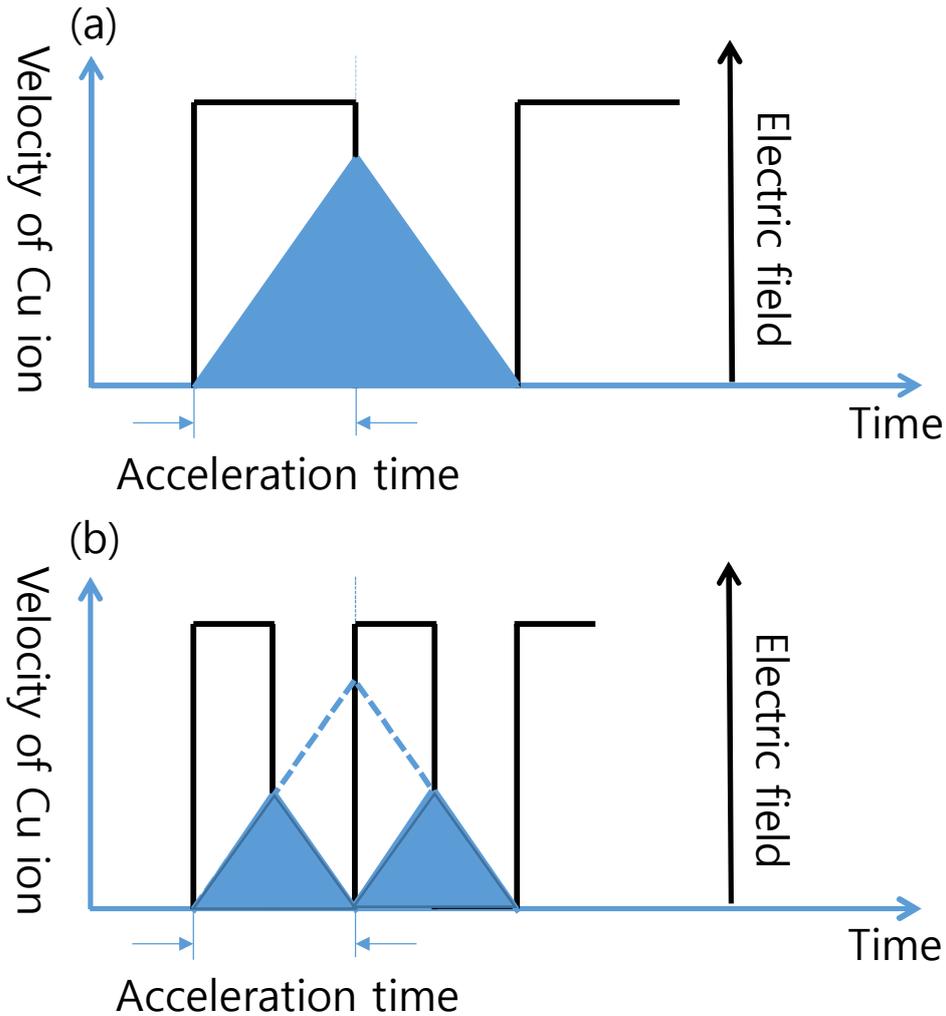


Figure 4-15 (a) Cu ion drift distance is equal to DC when dwell time is equal to acceleration time (b) Cu ion drift distance is smaller than DC when dwell time is smaller than acceleration time

Figure 4-15의 경우처럼, 전기장이 가해진 시간대비 가속시간이 길다면, 구리이온의 이동거리는 linear하게 감소하게 될 것이다. 하지만 Figure 4-13의 결과에서 기울기가 1이 아님으로, 내부의 이온의 운동이 등가속운동이 아니거나, 단순한 구리이온만으로

설명하기 어려운 절연파괴현상임을 알 수 있다. 이를 검증하기 위해서는 다양한 duty cycle에서 TDDB실험이 수행되어야 하며, 그 결과로부터 구리이동의 현상을 검증할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 구리 SiO_2 다마신 배선에 동적인 전기장을 인가하여 수명을 분석하고 파괴기구를 제안하였다. 공정이 성숙됨에 따라 구리이동이 기존 연구대비 제한됨을 확인하였다.

한계 주파수 이하에서는 DC, 단극성 이극성 전기장 조건에서 절연체 수명이 이극성의 경우 가장 길고, DC와 unipolar의 경우 절연체 수명이 비슷하였다. 이 결과를 통해서 구리 이동이 절연체 파괴에 영향을 미친다는 것을 판단할 수 있고, temperature resistance coefficient 및 triangular voltage sweep 실험을 통해서 이극성 전기장 조건에서는 구리 이동이 억제됨을 확인하였다.

한계 주파수 이상에서는 단극성 전기장에서의 수명이 DC의 수명보다 크며, 주파수 증가에 따라 단극성 전기장의 수명이 증가하였다. 이를 통해서 구리 이동뿐만 아니라 절연체 고유의 파괴도 절연체 수명에 영향을 미칠 수 있다는 것을 예상할 수 있었다.

단극성 전기장의 주파수에 따른 절연체 파괴에 미치는 영향을 설명하기 위해서 thermochemical 모델을 기반으로 반복적인 전기장 변화에 따른 분자 결합이 받는 응력의 변화를 피로 개념으로 생각하였다. 단극성 전기장 조건에서 한계 주파수 이상에서는 전기장이 가해지지 않을 때, 분자 결합이 받은 damage가 일정부분 회복되기 때문에 절연체 고유의 파괴가 항상 분자 결합에 응력이 가해지는 DC 조건보다 더디게 일어난다고 생각하였다. 구리 다마신 배선에서 구리 이동뿐만 아니라, 절연체 고유의 파괴도 절연체 수명에 영향을 미친다. Unipolar 펄스 형태로 전기장이 가해질 경우 특정 주파수 이상에서는

절연체 수명이 증가하기 때문에, 실제 소자의 절연체 수명은 DC 조건에서 절연수명을 예측한 값보다 더 클 수 있다.

하지만 실험이 수행된 100 kHz조건에서는 분자결합의 피로파괴 거동을 논하기에 낮은 주파수일 수 있다. 이에 전기장에서의 구리이온의 가속 시간을 고려하여 주파수에 따른 수명증가를 가정하였으나, 수명이 증가하는 현상은 설명할 수 있지만, 실험 결과의 정확한 분석은 어려웠다. 구리배선에서의 정확한 파괴메커니즘을 분석하기 위해서는 추가적으로 다양한 주파수에 대한 실험을 진행한다면 그 현상을 명확히 할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] R. Achanta, "Field dependence of TDDB lifetime activation energy in copper interconnects," *Reliability Physics Symposium, 2012*, 2012.
- [2] International Technology Roadmap for Semiconductors 2012
- [3] J. W. McPherson, "Time dependent dielectric breakdown physics – Models revisited," *Microelectronics Reliability*, vol. 52, pp. 1753–1760, 2012.
- [4] I. C. Chen, S. Holland, and C. Hut, "A quantitative physical model for time-dependent breakdown in SiO₂," in *Reliability Physics Symposium, 1985. 23rd Annual*, 1985, pp. 24–31.
- [5] A. W. Strong, E. Y. Wu, R.-P. Vollertsen, J. Sune, G. La Rosa, T. D. Sullivan, *et al.*, *Reliability wearout mechanisms in advanced CMOS technologies* vol. 12: Wiley. com, 2009.
- [6] J. Noguchi, N. Miura, M. Kubo, T. Tamaru, H. Yamaguchi, N. Hamada, *et al.*, "Cu-ion-migration phenomena and its influence on TDDB lifetime in Cu metallization," in *Reliability Physics Symposium Proceedings, 2003. 41st Annual. 2003 IEEE International*, 2003, pp. 287–292.
- [7] J. W. McPherson, *Reliability physics and engineering: time-to-failure modeling*: Springer, 2010.
- [8] N. Suzumura, S. Yamamoto, D. Kodama, K. Makabe, J.

- Komori, E. Murakami, *et al.*, "A New TDDB Degradation Model Based on Cu Ion Drift in Cu Interconnect Dielectrics," in *Reliability Physics Symposium Proceedings, 2006. 44th Annual., IEEE International*, 2006, pp. 484–489.
- [9] F. Chen, O. Bravo, K. Chanda, P. McLaughlin, T. Sullivan, J. Gill, *et al.*, "A Comprehensive Study of Low- k SiCOH TDDB Phenomena and Its Reliability Lifetime Model Development," in *Reliability Physics Symposium Proceedings, 2006. 44th Annual., IEEE International*, 2006, pp. 46–53.
- [10] W. Wen, D. Xiaodong, and J. S. Yuan, "Modeling of time-dependent dielectric breakdown in copper metallization," *Device and Materials Reliability, IEEE Transactions on*, vol. 3, pp. 26–30, 2003.
- [11] S.-Y. Jung, B.-J. Kim, N. Y. Lee, B.-M. Kim, S. J. Yeom, N. J. Kwak, *et al.*, "Bias polarity and frequency effects of Cu-induced dielectric breakdown in damascene Cu interconnects," *Microelectronic Engineering*, vol. 89, pp. 58–61, 2012.
- [12] N. Xu, L. Liu, X. Sun, X. Liu, D. Han, Y. Wang, *et al.*, "Characteristics and mechanism of conduction/set process in TiN/ ZnO/ Pt resistance switching random-access memories," *Applied Physics Letters*, vol. 92, p. 232112, 2008.

-
- [13] W. Guan, M. Liu, S. Long, Q. Liu, and W. Wang, "On the resistive switching mechanisms of Cu/ZrO₂:Cu/Pt," *Applied Physics Letters*, vol. 93, pp. –, 2008.
- [14] F. Chen, M. Shinosky, B. Li, J. Gambino, S. Mongeon, P. Pokrinchak, *et al.*, "Critical ultra low-k TDDDB reliability issues for advanced CMOS technologies," in *Reliability Physics Symposium, 2009 IEEE International*, 2009, pp. 464–475.
- [15] I. Ciofi, Z. Tokei, D. Visalli, and M. Van Hove, "Water and Copper Contamination in SiOC:H Damascene: Novel Characterization Methodology based on Triangular Voltage Sweep Measurements," in *Interconnect Technology Conference, 2006 International*, 2006, pp. 181–183.
- [16] H. Miyazaki, D. Kodama, and N. Suzumura, "The observation of stress-induced leakage current of damascene interconnects after bias temperature aging," in *Reliability Physics Symposium, 2008. IRPS 2008. IEEE International*, 2008, pp. 150–157.
- [17] S.-C. Lee and A. Oates, "Reliability of porous low-k dielectrics under dynamic voltage stressing," in *Reliability Physics Symposium (IRPS), 2012 IEEE International*, 2012, pp. 3A. 2.1–3A. 2.6.
- [18] E. Chery, X. Federspiel, G. Beylier, C. Besset, and D. Roy, "backend_dielectrics_reliability_under_unipolar_bipolar_ac_str

ess," *Reliability Physics Symposium, 2012*, 2012.

- [19] A. Bid, A. Bora, and A. K. Raychaudhuri, "Temperature dependence of the resistance of metallic nanowires of diameter ≥ 15 nm: Applicability of Bloch-Grüneisen theorem," *Physical Review B*, vol. 74, p. 035426, 07/24/2006.

Abstract

Continuous scaling of silicon semiconductor technology has driven harsh electrical and thermal stress. Technology node of damascene Cu interconnects will be shrunk to sub 20 nm and applied electric field on inter-layer dielectrics (ILDs) become 0.4 MV/cm within 2017 Years. Because of severe electric field with thermal stress, estimation of the dielectric reliability of damascene Cu interconnects using the time-dependent dielectric breakdown (TDDB) test under bias-temperature-stress condition is needed.

Moreover, since electronics are operated under unipolar and/or bipolar pulse-type electric field (dynamic electric field) rather than DC stress, effect of dynamic electric field on TDDB should be investigated.

However, to estimate the reliability of dielectrics in damascene Cu interconnects, reported TDDB models and dynamic electric field effect on breakdown of gate dielectrics cannot directly applied.

In damascene Cu interconnects, Cu migration into dielectrics can be occurred from Cu wire, it is called “extrinsic” breakdown in addition to “intrinsic” breakdown. Intrinsic- and extrinsic breakdown mechanisms should be considered for TDDB models and estimation of dielectric reliability in damascene Cu interconnects become more complicated than that of gate

dielectrics.

In this study, effect of dynamic electric field on damascene Cu/SiO₂ interconnects was investigated considering temperature dependence of TTF in addition to dependence of uni-, bi-polar pulse shape with various pulse frequency.

Certain specific pulse frequency, TTF_{Bi} was the longest and TTF_{Uni} and TTF_{DC} were similar regardless of stressing temperature. Based on the results the activation energy from Arrhenius plot of TTF and triangular voltage sweep experiments after TDDB test, we conclude that Cu migration significantly affect the dielectric breakdown in our tested samples.

However, when unipolar pulse frequency is exceeded the specific frequency, TTF_{Uni} become larger than TTF_{DC} . TTF_{Uni} was proportional to pulse frequency. It means that intrinsic breakdown also significantly affect the dielectric breakdown and intrinsic breakdown tendency is modulated by applied field shape. To explain the results, we firstly suggested that “Thermochemical-fatigue” TDDB model as adding the fatigue concept on the intrinsic Thermochemical model which is based on dipolar interaction of molecular bonding in dielectrics with applied electric field. Our suggested TDDB model would provide new insights into the accurate prediction of the dielectric reliability in damascene Cu interconnects, although equation for thermochemical-fatigue model still have empirical meaning only.

But the molecular bonds in the low-frequency fatigue behavior may be to discuss. So we considered the acceleration time of Cu ion under electric field. The increased life phenomenon with frequency increase can be explained, but an accurate analysis of the experimental results is difficult. In order to analyze the exact mechanism of Cu interconnect dielectric breakdown, further experiments with different frequencies and duty cycle would be able to clarify the phenomenon.

Keyword: Cu interconnect, Dielectric breakdown, TDDB, Unipolar, Bipolar

Student ID: 2012-20610