

# 질화, 재산화시킨 모스 절연막의 온도 변화에 따른 누설전류의 변화

이정석, 장창덕, 이용재  
동의대학교 전자공학과

## Temperature dependance of Leakage Current of Nitrided, Reoxidized MOS devices

Jung-Suk Lee, Chang-dug Jang, Young-Jae Lee  
Department of Electronic Engineering, Dong-eui University  
E-mail : yjlee@hyomin.dongueui.ac.kr

### Abstract

In this paper, we investigate the electrical properties of ultra-thin(70Å) nitrided(NO) and reoxidized nitrided oxide(ONO) films that are considered to be promising candidates for replacing conventional silicon dioxide film in ULSI level integration. we studied  $I_g-V_g$  characteristics to know the effect of nitridation and reoxidation on the current conduction, leakage current, time-dependent dielectric breakdown(TDDB) to evaluate charge-to-breakdown( $Q_{bd}$ ), and the effect of stress temperature(25, 50, 75, 100°C) and compared to those with thermal gate oxide( $SiO_2$ ) of identical thickness. From the measurement results, we find that reoxidized nitrided oxide(ONO) film shows superior dielectric characteristics, leakage current, and breakdown-to-charge( $Q_{bd}$ ) performance over the NO film, while maintaining a similar electric field dependence compared to NO layer. Besides, ONO film has strong resistance against variation in temperature.

### 1. 서 론

Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor(MOSFET)의 채널 길이가 감소함에 따라 바람직하지 않은 짧은 채널 효과가 나타나고, 이를 제거하기 위해서는 게이트 산화막 두께의 비례 축소가 요구된다. 그러나, 소자의 물리적 크기가 축소되면 소자 내에 고전계가 인가되므로 소자의 전기적 특성 및 신뢰성에 심각한 문제가 야기된다. 특히, 게이트 절연층인 실리콘 산화막의 두께가 수십 Å 정도로 얇게 되면 항복 전압이 낮아지고 누설 전류가 증가하게 되며, DRAM등의 기억소자에서는 신뢰성과 재현성에 많은 문제가 있게된다. 실리콘 산화막의 두께가 더욱더 얇아지면 게이트와 기판 사이에 직접 터널링이 일어날 수 있으며 게이트 다결정 실리콘을 주입시 불순물의 확산이 기판에 영향을 주어 소자의 불안정성을 유발하게 된다. 이런 실리콘 산화막의 물리적 한계를 극복하기 위하여 새로운 유전체인 NO 또는  $N_2O$ 를 이용한 질화 산화막, 재산화 질화 산화막,  $Ta_2O_5$ 막 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[1]</sup>

바람직한 게이트 절연막은 균일성이 좋아야하며, 결함밀도가 낮아야하고, 절연강도가 높아야한다. 또한, 소자의 안정성을 유지하기 위해서는 핫-전자 주

입에 대한 내구성이 요구된다. 이러한 성질의 산화막을 얻기 위하여 암모니아(NH<sub>3</sub>) 분위기에서 SiO<sub>2</sub>막을 열적으로 질화하는 것에 대한 연구가 제안되었다.<sup>[2]</sup>

NH<sub>3</sub>를 이용한 SiO<sub>2</sub>막의 질화는 Si-SiO<sub>2</sub>계면에 질소를 넣으므로써 계면 포획 밀도를 감소시키며, 불순물 확산에 대한 장벽 특성 및 핫 캐리어 안정성을 향상시킨다. 이러한 장점에도 불구하고, 질화는 질화 공정중에 발생하는 -NH<sub>x</sub>, -H, -OH등의 반응기들이 SiO<sub>2</sub>내로 주입되어 산화막내에 고정 전하 밀도를 증가시키고 많은 전자 포획을 유발시킨다. 이러한 단점을 해결하기 위하여 질화 산화막(NO)을 재산화하여 재산화 질화 산화막(ONO)을 형성시킴으로써 전자트랩 및 고정전하의 양을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 산화막(SiO<sub>2</sub>), 질화 산화막(NO) 및 재산화 질화 산화막(ONO)을 게이트 유전체로 사용한 MIS(Metal Insulator Semiconductor)구조의 커패시터를 각각 제작하여, 전기적 특성과 소자의 신뢰성을 분석함으로써 ULSI 소자 적용 가능성을 검토하고자 한다. NO막과 ONO막의 전도 메카니즘은 SiO<sub>2</sub>와 같이 F-N 터널링에 의하여 분석하였으며, 누설전류, 항복특성 및 정전류 스트레스 하에서 전하 트랩핑 현상과 시간종속 절연항복(TDDB) 특성을 연구하여 SiO<sub>2</sub>와 비교하였다. 또한, 스트레스 온도에 의한 특성 변화를 조사하였다.

## 2. 소자 제작

소자제작을 위한 전체 공정 순서도는 그림1과 같다. 결정방향이 (100)이고 비저항이 3-5Ω·cm인 붕소(boron)가 도핑된 p형 실리콘 웨이퍼를 세척 공정을 거친 뒤 석영관 로(quartz tube furnace)에 넣었다. 그리고 두꺼운 초기 산화막 층을 약 4000Å 정도 성장시킨 다음, 게이트 산화막을 형성하게 위한 창을 사진식각작업으로 열어 70Å 두께의 게이트 산화막을 건식 산소 분위기에서 900℃, 13분 동안 성장시켰다. 이 산화막은 순수한 암모니아(NH<sub>3</sub>)분위기에서 900℃, 10분간 질화 되었다. 이렇게 질화된 질화산화막은 900℃, 10분간 건식 산소 분위기에서 재산화 되었다. 앞으로 질화 산화막은 NO막, 재산화 질화 산화막은 ONO막이라고 한다.

4000Å 두께의 다결정 실리콘 게이트 전극은 저압 기상증착(LPCVD)방법으로 실란(silane)과 아르곤(Ar)의 혼합 가스를 625℃에서 열분해 하여 증착하였다. 그런 다음 POCl<sub>3</sub>를 925℃에서 25분 동안 도핑하여 형성한다. 6.4×10<sup>-3</sup> mm<sup>2</sup>의 면적을 갖는 n<sup>+</sup>폴

리실리콘 게이트가 리소그래피 및 건식 식각 기술을 이용하여 정의되었다. 0.5μm 두께의 SiO<sub>2</sub>막이 화학기상증착 공정으로 웨이퍼 위에 증착 되었고, 1000℃에서 30분간 질소분위기(N<sub>2</sub>)에서 열처리되었다. 알루미늄(Al) 증착 후, 수소분위기(H<sub>2</sub>)에서 450℃, 30분간 열처리되었다.

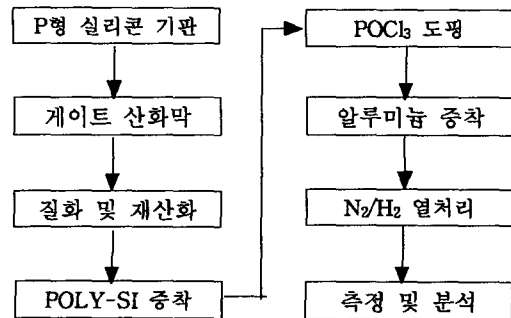


그림1 소자 제작 공정 순서  
Fig.1 Process Sequence

위의 공정을 거친 뒤 제작된 NO막의 두께는 엘립소메터를 사용하여 관측한 결과 70 Å으로 산화막과 거의 같았다. NO막의 두께가 같은 이유는 NH<sub>3</sub> 분위기에서 질화를 할 때, 시료에 고온의 열을 가하면 열분해가 일어나 N, H, OH, NH등의 반응기들이 생기게 되고, N이 산화막내로 침투하여 N이 마치 불순물처럼 확산하게 되기 때문이다. ONO막의 두께는 재산화 정도에 따라 같거나 수 Å 정도 증가하는데, 이것은 질화의 정도에 따라 결정된다.

## 3. 실험 및 결과 고찰

그림2는 MOS 소자의 전류 전도에 대한 질화와 재산화 영향을 알아보기 위하여 p형 기판이 축적모드가 되도록 게이트전극에 (-)전압을 인가하여 측정한 것으로, (a)에서는 전류-전압 특성곡선, 그리고 (b)에서는 Fowler-Nordheim 전류곡선을 나타내었다. 그림2(b)의 F-N 전류곡선으로부터 NO막과 ONO막의 전도 메카니즘은 SiO<sub>2</sub>와 같은 F-N 터널링에 의한 전류로 분석할 수 있다. 따라서, 전류의 크기는 WKB(Wentzel-Kramers-Brillouin)근사 방법으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$J = (q^3 E^2 / 8 \pi h \Phi_B) \exp[-4 (2m_0^*)^{1/2} \Phi_B^{3/2} / 3 h q E] \quad (1)$$

$$J = \left( \frac{q^3 E^2}{8 \pi h \Phi_B} \right) \exp \left[ -4 \left( \frac{2m_0^*}{3 h q E} \right)^{1/2} \Phi_B^{3/2} \right] \quad (1)$$

$E$  = Si-SiO<sub>2</sub> 계면에서 전계의 세기  
 $m_0^*$  = 전자의 유효 질량  
 $\Phi_B$  = 전위 장벽 높이

질화는 표면 영역에 질소를 넣으므로 다결정 실리콘과 산화막 계면에서의 장벽 높이를 감소시켜 F-N 터널링 전류를 증가시킨다고 보고되어 있다.<sup>[3]</sup>

그림2에서 나타나듯이 질화막(NO)에서 장벽 저하에 의해 F-N 전류가 증가하였음을 보여주고 있다. 또한 ONO막의 F-N 전류가 감소하는 것으로부터 질소가 많은 표면층을 재산화 함으로서 전위장벽이 향상되었음을 나타내고 있다.

그림3은 SiO<sub>2</sub>, NO, ONO막막에 10MV/cm의 일정한 전계를 인가하였을 때 소자에 흐르는 전류 값을 누설전류로 정의하여 나타낸 것이다. 그림으로부터 NO막의 누설전류가 SiO<sub>2</sub> 및 ONO막에 비하여 큰 것을 알 수 있는데, 이것은 유전 박막 내의 수소 원자에 의해 전자 포획이 증가하고 Si-SiO<sub>2</sub>계면에서 결정결함이 증가하기 때문인 것으로 여겨진다. ONO박막은 재산화 과정에서 Si-SiO<sub>2</sub>계면 상태가 개선되어 누설전류 특성이 NO막보다 우수하게 나타났다. 이 누설전류의 스트레스 온도의 영향을 알아보기 위하여 온도변화(25, 50, 75, 100°C)에 따른 누설전류의 변화도 같이 나타내었다. 스트레스 온도가 증가함에 따라 누설전류도 증가한다는 것을 알 수 있는데, 누설전류의 증가 원인으로서는 온도가 증가할수록 트랩 생성율이 증가하기 때문인 것으로 추정되고 있다.<sup>[4]</sup>

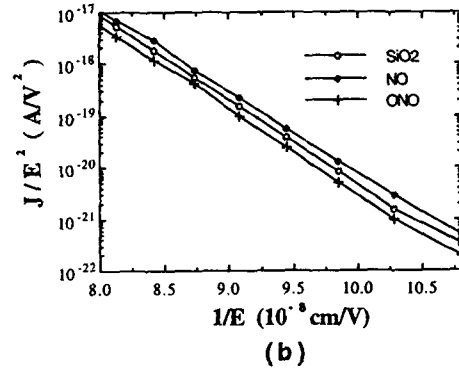
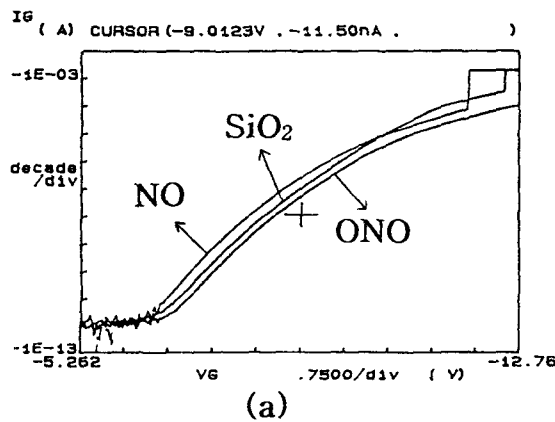


그림2 (a) Ig-Vg 특성곡선 (b) Fowler-Nordheim 전류곡선  
 Fig.2 (a) Ig-Vg Characteristics (b) Fowler-Nordheim current characteristics.

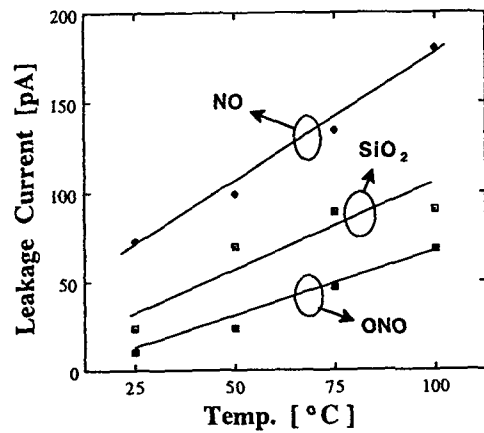


그림3 누설전류에 대한 온도의 영향  
 fig.3 Stress temperature dependence of Leakage current

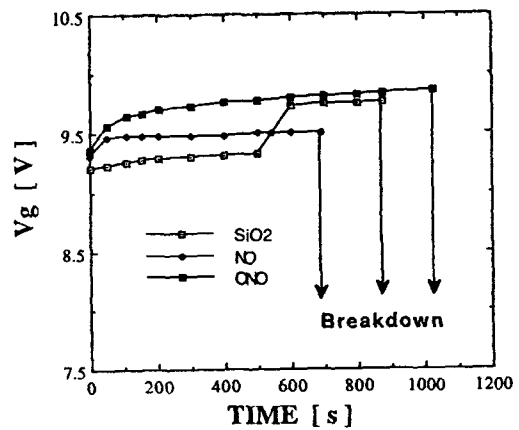


그림4 TDDB 특성  
 Fig.4 TDDB characteristics

박막의 신뢰성을 분석하기 위한 시간 종속 항복 특성(TDDB)의 측정은 8mA/cm<sup>2</sup>의 정전류 스트레스를 인가한 상태에서 절연파괴에 이르는 시간을 측정하는 것으로 그림4에 나타내었다. 그림에서 NO막의 TDDB특성이 상당히 열화 되었다는 것을 알 수 있다. 애노드 전계가 빨리 증가할수록 절연막의 항복에 이르는 시간은 짧아지는데, NO막내에서는 많은 수의 전자 포획이 일어남에 따라 다른 막에 비해 기관 쪽의 산화막 전계(애노드 전계)가 먼저 증가하므로 항복이 일어나는 시간( $t_{bd}$ )이 짧다. 이에 비하여 ONO막의  $t_{bd}$ 가 가장 긴 것으로부터 ONO막의 항복특성이 가장 좋음을 알 수 있다.

TDDB 측정 결과에서 절연파괴가 일어나는 지점의 시간을 측정함으로써 박막이 항복에 도달하는 단위 면적당 전하량  $Q_{bd}$ 를 다음 식(2)를 이용하여 추출할 수 있다.

$$Q_{bd} = \int_0^{t_{bd}} J dt = J \cdot t_{bd} \quad (C/cm^2) \quad (2)$$

$t_{bd}$  = 유전체가 항복이 일어난 시간

그림5는 정전류 스트레스(8mA/cm<sup>2</sup>)하에서 각 절연막에 대해 스트레스 온도가 25, 50, 75, 100°C일 때  $Q_{bd}$ 의 값을 나타낸 것이다. 그림의 전체적인 추세는 온도가 증가할수록  $Q_{bd}$ 의 값이 감소함을 나타내고 있는데, 그 원인은 다음 2가지로 분석될 수 있다. 첫 번째 원인은, 온도가 올라감에 따라, 원자간 결합이 부드러워지기 때문에 끊어지기가 더 쉬워진다. 끊어진 결합이 많아지면 트랩 생성율이 증가하게 되고,  $Q_{bd}$ 는 감소하게 된다. 두 번째는, 온도가 올라감에 따라 격자 진동은 가속화되고, 그에 따라 주입된

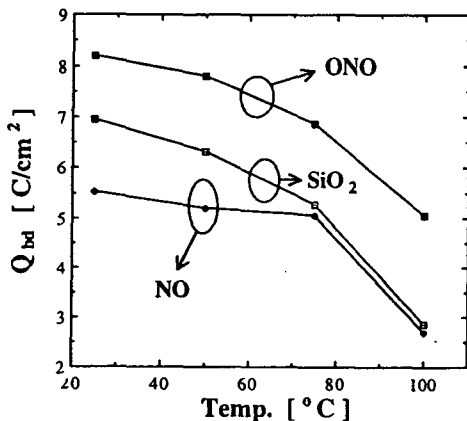


그림5  $Q_{bd}$ 의 온도 의존성

Fig.5 Stress temperature dependence of charge-to-breakdown( $Q_{bd}$ )

전자와 격자사이의 상호작용이 증가해 산화막에 피해를 주는 확률이 커지게 된다.  $Q_{bd}$ 의 온도 의존성에 있어서도 ONO막이 우수한 것으로 나타나 ONO막의 신뢰성이 가장 좋음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 열산화막(SiO<sub>2</sub>), 질화산화막(NO)과 재산화 질화 산화막(ONO)의 전류-전압특성, 누설전류, 시간종속 절연항복특성, 그리고 각 특성의 온도의존성을 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

F-N 전류곡선으로부터 NO막과 ONO막의 전도 메카니즘은 SiO<sub>2</sub>막과 같이 F-N 터널링에 의한 전류성분으로 분석할 수 있었다. NO막에서는 공정과정 중에 유입되는 수소와 관계된 반응기(NH<sub>x</sub>, OH, H)에 의한 결정결함의 증가로 인하여 항복전압 및 누설전류 특성이 열화 되었으나, ONO막에서는 재산화의 영향으로 특성이 현저히 개선되었다. 또한 누설전류에 대한 온도의 영향으로부터 온도가 증가할수록 누설전류도 증가한다는 것을 알 수 있었다. TDDB특성으로부터 각 절연막의 파괴전하량( $Q_{bd}$ )은 각각 SiO<sub>2</sub>=6.9, NO=5.5, ONO=8.2 C/cm<sup>2</sup>였다. 또한  $Q_{bd}$ 의 온도의존성으로부터 온도가 증가할수록  $Q_{bd}$ 가 감소함을 알 수 있었다. 종합해 볼 때, ONO막이 전기적 특성과 신뢰성에 있어서 가장 우수하고, 특히 스트레스에 강한 내성을 나타내므로 ULSI 유전체로 응용이 될 수 있을 것으로 평가된다.

#### 5. 참 고 문 헌

- [1] E. Hasegawa, et al, "SiO<sub>2</sub>/Si Interface Structure and Reliability Characteristics," J. Electrochem. Soc., 142(1), pp.273-281, 1995.
- [2] P. Pan, "Characteristics of thermal SiO<sub>3</sub> films during nitridation," J. Appl. Phys., vol. 61, p. 284, 1986.
- [3] B.Joshi, et al, "Effect of Rapid Thermal Reoxidation on the Electrical Properties of Rapid Thermally Nitrided Thin Gate Oxides", IEEE Trans. Electron Devices, vol.39, pp.883-892, 1992
- [4] P.Apte, et al, "Correlation of Trap Generation to Charge-to-Breakdown ( $Q_{bd}$ ) : A Physical Damage Model of Dielectric Breakdown", IEEE Trans. Electron Devices, vol. 41 pp. 1595-1601, 1994