

Scaled MONOS 비휘발성 기억소자의 스위칭 특성

Switching characteristics of the Scaled MONOS Nonvolatile Memory Devices

이상배* 광운대학교 전자재료공학과
 김선주 광운대학교 전자재료공학과
 이성배 광운대학교 전자재료공학과
 강장수 유한전문대 전자과
 서광열 광운대학교 전자재료공학과

Sang-bae, Yi Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon Univ.
 Seon-Ju, Kim Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon Univ.
 Sung-bae, Lee Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon Univ.
 Chang-Soo, Kang Dept. of Electronics, Yuhan Junior College
 Kwang-Yell, Seo Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon Univ.

ABSTRACT

This study is to investigate the switching characteristics in the 5V-programmable scaled MONOS nonvolatile memory devices. Modified Fowler-Nordheim tunneling mechanism become important when the electric field in the tunneling oxide is 6 MV/cm. For $E_{OT} = 6$ MV/cm, the trap-assisted tunneling mechanism is dominant. The density of nitride bulk trap is found to be $N_T = 7.7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, and the energy level of trap is determined to be $\phi_T = 0.65 \text{ eV}$.

I. 서론

MONOS(metal-oxide-nitride-oxide-semiconductor) 비휘발성 기억소자는 scale-down에서 한계를 보인 MNOS(metal-nitride-oxide-semiconductor) 비휘발성 기억소자의 대체소자로 개발되어 E²PROM의 가장 이상적인 NVSM으로 알려져 최근에 많은 연구가 수행되고 있다. 최근 MONOS 기억소자가 기존의 마이크로 컴퓨터 시스템, 나아가서는 hard disk 대체용으로 응용되기 위해서는 고집적도를 위한 셀 크기의 소형화, 프로그래밍 전압의 감압, 그리고 프로그램 시간의 단축이 필요하여 광원자적으로 소자의 scale-down이 요구되고 있다. switching 특성에 관한 연구는 이와 같은 소자의 scale-down에 있어서 중요한 광원자 정보를 제공한다. 이 점에서 대단히 중요하다.

본 논문은 5V의 프로그래밍 전압과 고집적의 full-featured E²PROM을 위한 scaled MONOS 구조의 캐패시터형 기억소자를 제작한 다음, 스위칭 특성을 조사하여 기억전하의 전송기구를 규명한 것이다.

II. 이론

Scaled MONOS 비휘발성 기억소자에서 프로그래밍 전압이 t_p 일 때 프로그래밍 전압 $V_p(t_p)$ 는 다음과 같다.

$$V_p(t_p) = \left(x_{OT} + x_{OB} + \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_n} x_N \right) E_{OT}(t_p) + \phi_{TS} + \phi_S - \left(\frac{x_{OR}}{\epsilon_w} + \frac{x_N}{2\epsilon_n} \right) Q_N(t_p) \quad (1)$$

여기서 x_{OT} , x_{OB} , x_N 은 각각 터널링 산화막, 불포킹 산화막, 그리고 절화막 두께이고, ϵ_{ox} , ϵ_n 은 산화막 및 절화막의 유전율, ϕ_S 는 실리콘 반도체의 표면전위, ϕ_{TS} 는 반도체와 금속의 일함수차, $E_{OT}(t_p)$ 와 $Q_N(t_p)$ 는 시간 t_p 에서 터널링 산화막의 전기장 세기 및 기억트랩에 트랩된 전하량이다.

식(1)을 프로그래밍 시간 t_p 에 대해서 미분하면

$$\left(\frac{x_{OT}}{\epsilon_n} + \frac{x_N}{2\epsilon_n} \right) \frac{dQ_N(t_p)}{dt_p} = \left(x_{OT} + x_{OB} + \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_n} x_N \right) \frac{dE_{OT}(t_p)}{dt_p} \quad (2)$$

와 같다. 식(2)를 전류원순방향식에 대입하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dE_{OT}(t_p)}{dt_p} = -A J [E_{OT}(t_p)] \quad (3)$$

$$A = \frac{\frac{x_{OB}}{\epsilon_{ox}} + \frac{x_N}{2\epsilon_N}}{x_{OT} + x_{OB} + \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_N} x_N}$$

여기서, J 는 터널링 산화막을 통한 터널링 전류이다. 터널링 산화막의 전기장 세기가 $(\phi_1 - \phi_2) / [X_{OT} + (\epsilon_{ox}/\epsilon_N) X_N]$ 보다 크고 $(\phi_1 - \phi_2)/X_{OT}$ 보다 작은 경우에는 modified Fowler-Nordheim 터널링이 주도적이며 특히 $E_{OT} > 6\text{MV/cm}$ 이면, 터널링 전류는 다음의 근사식으로 나타낼 수 있다.¹⁾

$$J_{FN}(t_p) \approx BE_{OT}^2(t_p) \exp[-E_T / |E_{OT}(t_p)|] \quad (4)$$

$$B = \frac{q^2}{16\pi^2 \hbar \phi_1} \quad (5)$$

$$E_T = \frac{A(\phi_1 - \phi_2) \sqrt{2m_{ox}^* q \phi_1}}{3\hbar} \quad (6)$$

여기서 ϕ_1, ϕ_2 는 각각 터널링 산화막과 절화막의 상비 높이이고, m_{ox}^* 는 산화막에서 정공의 유효질량이다.

식(4)를 식(3)에 대입하여 얻은 미분 방정식을 풀면, 아래와 같은 시각 t_p 에서 터널링 산화막의 전기장 세기를 구할 수 있다.

$$E_{OT}(t_p) = \frac{E_{OT}(0)}{1 + \frac{E_{OT}(0)}{E_T} \ln(1 + t_p/\tau)} \quad (7)$$

$$\tau = \tau_1 \exp[E_T/E_{OT}(0)] \quad (8)$$

$$\tau_1 = [ABE_T]^{-1} \quad (9)$$

여기서 $E_{OT}(0)$ 는 $t=0$ 에서 터널링 산화막의 전기장 세기이며 다음식과 같다.

$$E_{OT}(0) = \frac{V_p + \left(\frac{x_{OB}}{\epsilon_{ox}} + \frac{x_N}{2\epsilon_N} \right) Q_N(0) - \phi_{ox} - \phi_s}{x_{eff}} \quad (10)$$

식(1)과 식(7)로부터 프로그래밍 시간 및 프로그램 전압에 대한 flatband 전압의 이동량을 구하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta V_{FB}(V_p, t_p) = V_{FB}(V_p, t_p) - V_{FB}(V_p, 0) \quad (11)$$

$$= x_{eff} \frac{E_{OT}^2(0)}{E_T}$$

터널링 산화막 전기장의 세기가 $(\phi_1 - \phi_2) / [X_{OT} + (\epsilon_{ox}/\epsilon_N) X_N]$ 보다 크고 6MV/cm 보다 작은 경우에는 trap-assisted 터널링이 주도적이며 이러한 터널링 전류는 다음식과 같다.

$$J_{TAT}(E_{OT}) = \frac{qN_t}{\tau_0 \left[\frac{q|E_{OT}|}{\epsilon_{ox}} - 2k_n \right]} \exp \left[-2 \left(k_{ox} - \frac{\epsilon_n}{\epsilon_{ox}} k_n \right) x_{OT} \right] \frac{2 \frac{\epsilon_n}{\epsilon_{ox}} k_n (\phi_1 - \phi_2 - \phi_s)}{|E_{OT}|} \quad (12)$$

$$k_{ox} \approx (2m_{ox}^* q \phi_1)^{1/2} / \hbar$$

$$k_n \approx (2m_n^* q \phi_s)^{1/2} / \hbar$$

여기서 τ_0 는 시정수, N_t 와 ϕ_s 는 각각 절화막 밴드갭 밀도와 에너지 준위이고, m_n^* 은 절화막에서 정공의 유효질량이다.

III. 소자제작

비지향성 6-9 Ω -cm인 (100)방향의 p형 실리콘 웨이퍼를 950°C, 상압에서 질소로 희석시킨 산소를 사용해서 30분간 열산화시켜 터널링(tunneling)산화막을 성장시켰으며, 그 두께는 19Å이다. 절화막은 750°C에서 SiH₄Cl₂와 NH₃의 혼합가스를 반응시켜 LPCVD 방법으로 터널링 산화막위에 퇴적시켰다. 이렇게 퇴적시킨 절화막의 두께는 57Å이었다. 블로킹(blocking)산화막은 950°C의 상압에서 H₂O=5 l/min:8 l/min인 혼합가스를 사용해서 절화막을 열산화시키므로써 성장시켰으며, 두께는 20Å이다. 게이트전극은 junction spike를 방지하고, step coverage를 향상시키기 위해서 MoSi₂와 Cu가 0.5%, Si가 1% 함유된 Al의 이중구조로 형성하였다.

IV. 결과 및 고찰

절화막 두께가 $X_N=57\text{Å}$ 이고, 터널링산화막 및 블로킹 산화막 두께가 각각 $X_{OT}=19\text{Å}$, $X_{OB}=20\text{Å}$ 인 scaled MONOS 비휘발성 기억소자에서 프로그래밍 전압의 크기를 각각 달리하여 프로그래밍 시간에 따른 flatband 전압 V_{FB} 를 측정하므로써 스위칭특성을 조사하였으며, 그 결과는 그림 1과 같다. 프로그래밍 전압을 인가하기 전에는 항상 소자의 게이트에 크기와 폭이 각각 10V, 100msec인 양(+)의 펄스전압을 인가하여 초기 flatband 전압이 $V_{FB}=0.30\text{V}$ 가 되도록 측정초기 상태를 조절한다. 그림에서 보는 바와 같이 프로그래밍 전압이 $V_p=5\text{V}$ 인 경우에 프로그래밍 시간이 $t_p=20\text{msec}$ 이상일 때 flatband 전압값이 감지 불가능준위(insensible level)를 벗어나기 때문에 프로그래밍이 되었음을 알 수 있다.

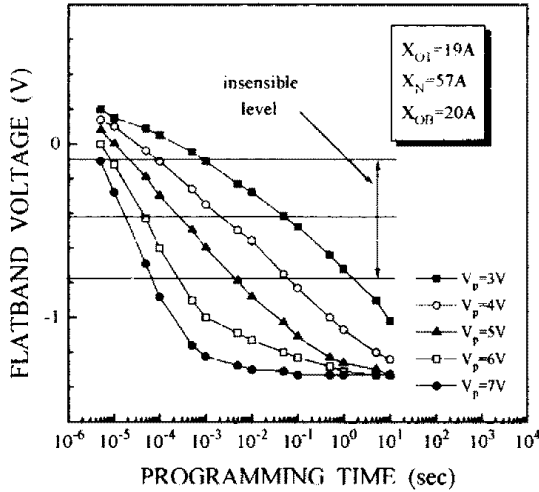


Fig.1 Flatband voltage with programming time for different programming voltages.

그림 1의 측정된 flatband 전압 V_{FB} 에서 초기 flatband 전압 V_{FB0} 를 빼면, flatband 전압 이동량 ΔV_{FB} 를 구할 수 있다. 프로그래밍 전압을 달리하여 프로그래밍 시간에 따른 flatband 전압 이동량을 나타내면 그림 2와 같다. 그림 2의 점선은 modified Fowler-Nordheim 터널링모델을 나타내는 식(11)을 이용해서 구한 이론곡선이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 터널링산화막 전기장세기 가 $E_{OT} = 6.35 \text{ MV/cm}$ 이상이 되는 $V_p = 5 \text{ V}$ 이상인 프로그래밍전압에 대해서 이론곡선은 포화하기 직전까지의 실험곡선과 잘 일치함을 알 수 있다. 반면에 $V_p = 3 \text{ V}$ 와 $V_p = 4 \text{ V}$ 인 경우 ($E_{OT} < 6 \text{ MV/cm}$), 이론곡선과 실험곡선은 잘 일치하지 않는다. 특히, 프로그래밍 전압이 작을 수록 일치되는 부분도 작아짐을 알 수 있다. 이로부터 $E_{OT} < 6 \text{ MV/cm}$ 인 경우에는 주도적인 터널링 기구가 modified Fowler-Nordheim 기구와 다름을 알 수 있다.

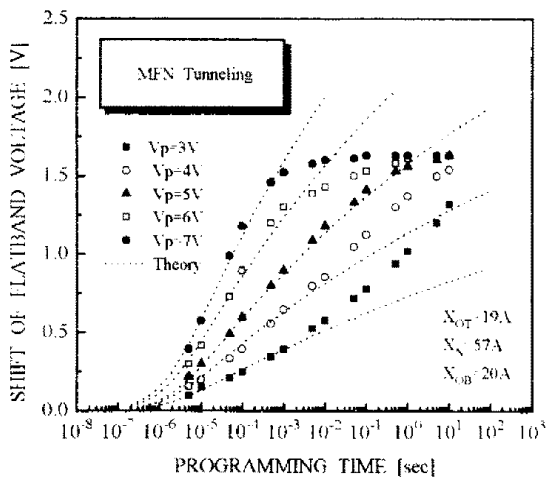


Fig.2 Flatband voltage shift with programming time for different programming voltages.(.....: theoretical curves calculated for modified Fowler-Nordheim tunneling)

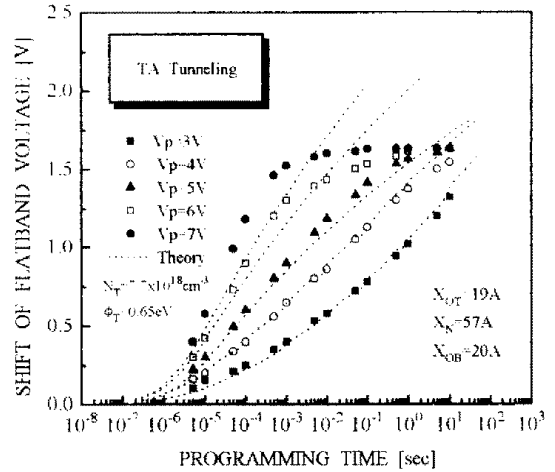


Fig.3 Flatband voltage shift with programming time for different programming voltages.(.....: theoretical curves calculated for trap-assisted tunneling)

Trap-assisted 터널링모델을 나타내는 식(12)를 식(3)에 대입하여 얻은 미분방정식을 수치해석적으로 적분하여 계산한 결과는 그림 3의 점선과 같다. 계산시, 질화막벌크트랩밀도는 $N_T = 7.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 를, 트랩준위는 $\phi_T = 0.65 \text{ eV}$ 를 대입하였다. 이때, 트랩밀도는 이비 보고한 바와 같이 최대 flatband 전압 이동량을 이용하여 구한 값이다.^[1]

그림에서 보는 바와 같이 프로그래밍 전압이 $V_p = 3 \text{ V}$ 와 $V_p = 4 \text{ V}$ 일 때 이론곡선은 계산곡선과 잘 일치함을 알 수 있다. 이로부터 프로그래밍 전압이 $E_{OT} < 6 \text{ MV/cm}$ 에 상응할 때는 trap-assisted 터널링이 주도적임을 알 수 있다.

V. 결론

5V-programmable scaled MONOS 비휘발성 기억소자를 제작한 다음 스위칭 특성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

[1] $V_p = 5 \text{ V}$ 이상 ($E_{OT} > 6 \text{ MV/cm}$)인 경우 modified Folwer-Nordheim 터널링이 주도적이다. $V_p = 4 \text{ V}$ 이하 ($E_{OT} < 6 \text{ MV/cm}$)인 경우 trap-assisted 터널링이 주도적이다.

[2] 질화막 벌크트랩 밀도는 $N_T = 7.7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 이고, 트랩준위는 $\phi_T = 0.65 \text{ eV}$ 이다.

참고문헌

- 1) Y. Yatsuda, et al., Jap. J. Appl. Phys., Vol.21, p.85 (1981)
- 2) T. Nazaki, et al., IEEE J. Solid-State Circuits, Vol.26, p.497 (1991)

- 3) Y. Hu, et al., Solid-State Electro., Vol.36, p.1401 (1993)
- 4) M. L. French, et al., Solid-State Electro., Vol.37, p.1913 (1994)
- 5) 이상배등, 제2회 전국연도회 학술대회 논문집, p.135 (1995)