

전하주입조건에 따른 비휘발성 MNOS 기억소자의 기억유지특성에 관한 연구

이 경 루[○], 이 상 배, 이 상 은, 서 광 열
광운대학교 전자재료공학과

A Study on the Retention Characteristics with the Charge Injection Conditions in the Nonvolatile MNOS Memories

Kyoung-leun Lee[○], Sang-bac Yi, Sang-eun Lee, Kwang-yell Seo
Dept. of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon Univ.

ABSTRACT

The switching and the retention characteristics with the injection conditions (pulse height and pulse width) were investigated in the nonvolatile MNOS memories with thin oxide layer of 23Å thick. The shift of flatband voltage was measured using the fast ramp C-V method and experimental results were analyzed using the previously developed models. It was shown that the experimental results were described quite well by the trap-assisted and modified Fowler-Nordheim tunneling models for the voltage pulse of 15V~19V, 24V~25V, respectively. However, the direct tunneling model was agreement with experimental values in all range of pulse height.

As increasing the initial shift of the flatband voltage, the decay rate was increased. But for the same initial shift of the flatband voltage, the decay rate was smaller for low and long pulse than for high and short one.

I. 서론

비휘발성 MNOS(Metal-Nitride Oxide Semiconductor)기억소자는 게이트가 이중절연막 구조로서 절화막-산화막 계면과 절화막 내에 존재하는 트랩의 특성을 이용, 전기적으로 기의 및 소거가 가능한 EEPROM(Electrically Erasable and Programmable Read Only Memory) 소자이다.¹⁾ 현재 고집적화를 위한 Scale down, 기억동작의 저전압화 등 실제용용 및 기억유지특성, 열화 특성개선 등 소자특성 향상에 많은 연구가 이루어지고 있으며, 이를 위해서는 절연체 내부의 전하주입, 전하전송 및 트랩핑 뿐만 아니라 기억트랩분포에 관한 광범위한 정보를 필요로 한다.

본 연구는 산화막 20Å, 절화막 530Å인 커패시터형 비휘발성 MNOS기억소자의 주입조건에 따른 스위칭특성을 조사 하였다. 이를위해서 flatband 전압 이동량은 빠른램프 C-V방법을 이용하여 측정하였으며, 측정된 결과를 기준에 제안된 모델들에 적용하여 분석하므로써 기억트랩전하의 분포 및 특성상수, 펄스전압에 따른 주도적인 전하전송기구를 조사하였다. 또한 주입조건에 따른 기억유지특성도 조사하였다.

II. 이론

II-1. modified Fowler-Nordheim 주입

비교적 큰 양(+)의 펄스전압을 게이트에 인가하면 실리콘 전도대의 전자는 산화막 및 절화막 일부를 터널링하여 절화막 전도대로 주입된다. 이와같이 modified Fowler-Nordheim 터널링에 의한 전류식은 다음과 같이 표현될 수 있다.²⁾

$$J_{MFN} = \frac{q^2 m_{si}^*}{8\pi h \phi_1 m_{ox}^*} E_{ox}^2 P_{ox} P_n \quad (1)$$

$$P_{ox} = \exp\left[-\frac{8\pi}{3} \frac{\sqrt{2 m_{ox}^* q}}{h E_{ox}} (\phi_1^{3/2} - (\phi_1 - E_{ox} W_{ox})^{3/2})\right]$$

$$P_n = \exp\left[-\frac{8\pi}{3} \frac{\sqrt{2 m_n^* q}}{h E_n} (\phi_1 - \phi_2 - E_{ox} W_{ox})^{3/2}\right] \quad (2)$$

여기서, q는 단위전하량, m_{si}^* , m_{ox}^* 와 m_n^* 은 각각 실리콘, 산화막과 절화막에서의 유효질량이며, h는 Plank 상수, ϕ_1 과 ϕ_2 는 각각 실리콘 기판 및 절화막 쪽에서의 전위장벽의 크기, P_{ox} 와 P_n 은 산화막과 절화막의 터널링 확률, E_{ox} 와 E_n 은 각각 산화막과 절화막의 전기장 세기이다.

기억전하의 주입으로 인한 Flatband 전압은 아래 식과 같다.

$$V_{FB} = V_{FB0} + \epsilon_{ox} \frac{E_A}{C_G} \ln\left[\exp\left(-\frac{(V_{FBI} - V_{FB0}) C_G}{\epsilon_{ox} E_A} + \frac{t_P}{t_s}\right)\right] \quad (3)$$

여기서, t_P 는 펄스전압폭이며, E_A 와 t_s 는 다음과 같이 정의된다.

$$E_A = \left[-\frac{\partial \ln |J_{ox}|}{\partial |E_{ox}|}\right]^{-1} \quad t_s = \frac{C_N \epsilon_{ox} E_A}{C_G J_{ox}(E_{ox0})} \quad (4)$$

E_{ox0} 는 초기 산화막 전계이며 아래식과 같다.

$$E_{ox0} = \frac{V_P}{\epsilon_{ox}} C_G \quad (5)$$

II-2. Trap assisted 주입 모델

게이트에 크기가 작은 양(+)의 펄스전압을 인가하면 전압 인가시 실리콘 전도대의 전자는 산화막을 터널링하여 절화막의 트랩에 트랩핑된 후, 열적여기하여 인해 절화막의 전도대로 주입된다. 단일 트랩준위(ϕ)를 가정한 경우 절화막 전도대로 주입된 총 전류 J_{TA} 는 다음과 같다.³⁾

$$J_{TA} = \int_0^{x_m} \frac{q N_t f_s}{\tau_1} dx \quad (6)$$

여기서, N_t 는 기억트랩밀도, x_m 은 산화막-절화막 계면으로 부터 절화막 내의 기억트랩까지의 최대 터널링 거리이고, τ_1 은 터널링 시정수로 다음과 같다.

$$\tau_1 = \tau_0 \exp(2 k_{ox} W_{ox} + 2 k_n x) \quad (7)$$

τ_0 는 상수로서 조정할 수 있는 파라미터이고, k_{ox} 및 k_n 은 시상 수이고, k_{ox} 와 k_n 은

$$k_{ox} \approx \frac{2\pi(2 m_{ox}^* q \phi_1)^{1/2}}{h} \quad (8)$$

$$k_n \approx \frac{2\pi(2 m_n q \phi_1)^{1/2}}{h} \quad (9)$$

로 주어지며, f_s 는 실리콘의 Fermi 인자로서 아래와 같이 근사될 수 있다.

$$f_s \approx \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) \quad (10)$$

여기서, $V = \phi_3 - E_{ox} W_{ox} - E_n x$ 이며, $\phi_3 = \phi_1 - \phi_2 - \phi_t$ 이다.

II-2 Direct 터널링 모델

게이트에 양(+)의 펄스전압을 인가한 경우 전자는 실리콘 전도대에서 산화막을 직접 터널링 하여 기억트랩에 트랩핑 된다. 이때, 주입된 기억전하량 $Q(t)$ 는 다음식과 같다.⁴⁾

$$\frac{Q(t)}{qN_t\lambda} = \left[\frac{(x_m - W_{ox})}{\lambda} + E_1\left(\frac{t_p}{t_0}\right) - E_1\left(\frac{t_p}{t_m}\right) \right]$$

$$\frac{1}{t_0} = \omega_0 e^{-\frac{x_0}{\lambda}}, \quad \frac{1}{t_m} = \omega_0 e^{-\frac{x_m}{\lambda}} \quad (11)$$

여기서, N_t 는 트랩밀도, λ 는 전위장벽 모양에 의존하는 상수⁵⁾이며 $E_1(t_p/t_0)$ 는 exponential integral 함수⁶⁾이다. x_0 는 최소 터널링 거리, ω_0 는 터널링 시정수이다. 기억전하의 주입으로 인한 flatband 전압 이동량 ΔV_{FB} 는 다음과 같다.

$$V_a(t) = \frac{W_{ox}qN_t\lambda}{\epsilon_n} \left[\frac{(x_m - W_{ox})}{\lambda} + E_1\left(\frac{t_p}{t_0}\right) - E_1\left(\frac{t_p}{t_m}\right) \right] \quad (12)$$

III. 실험

본 실험에 사용한 소자는 비저항이 5~8 Ωcm 인 n형 실리콘 (100) 기판위에 산화막 두께를 23Å, 전하막 두께를 530Å으로 한 커패시터형 MNOS기기의 소자이다. 기억전하의 주입조건(펄스 전압크기 및 폭)에 따른 스윓특성과 기억유지특성조사는 빠른 랩프방법을 이용하였다. 빠른 랩프방법으로 측정된 C-V곡선으로부터 flatband 전압을 측정하였으며 측정 전에는 음(-)의 전압을 게이트에 약 30sec동안 인가하여 기억트랩의 전하를 소거시켜 MNOS구조의 초기 flatband전압(V_{FB0})상태를 -7.2V로 일정하게 유지하였다. 이러한 상태에서 펄스전압크기(15V~30V)를 일정하게 하고 펄스폭(5 μs ~100sec)을 변화시켜 각각의 경우에 대한 flatband 전압을 측정하였다.

기억유지특성조사는 초기 flatband전압 이동량 (ΔV_{FB0})가 되도록 펄스전압 크기 및 펄스폭을 조절하여, 같은 ΔV_{FB0} 를 갖는 기억전하 주입조건을 구한 다음 각각의 경우에 대하여 10⁴sec 까지 경과시간에 따른 flatband전압을 측정하여 감소율(decay rate)를 구하였다.

IV. 결과 및 고찰

IV-1. 주입조건에 따른 전하전송기구

주입펄스전압의 크기가 각각 다를때 펄스폭에 따른 flatband전압을 측정된 결과는 그림1과 같다. 그림으로부터 알 수 있듯이 flatband전압은 펄스전압의 크기 및 폭이 클 수록 증가하였다. 또한 modified Fowler-Nordheim 터널링 모델로부터 얻은 식(3)에 의해서 계산한 이론곡선과 실험곡선을 best fitting 시킨 결과는 그림1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 주입펄스전압의 크기가

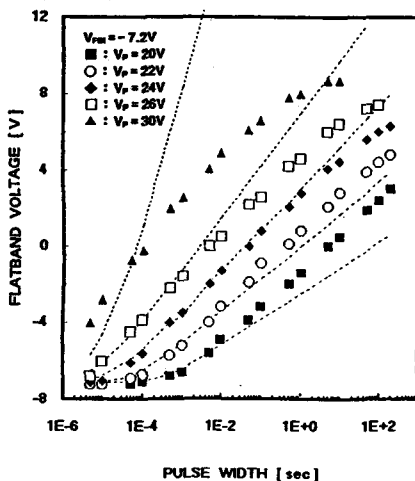


그림1. Modified Fowler-Nordheim 모델과 실험곡선 비교

$V_p=24V$, $25V$ 일때 이론곡선과 실험곡선이 잘 일치하였으나, 이보다 더 크거나 작은 전압에 대해서는 일치하지 않았다. 특히 큰 전압의 경우에는 이론값이 실험값 보다 더 컸으며, 작은 전압의 경우에는 이론값이 실험값 보다 작았다. 이것은 $V_p=24V$ 인 경우에는 기억전하의 주입기구를 수정해야 함을 뜻한다. 따라서, $V_p=15V$, $17V$, $19V$, $20V$, $22V$ 인 경우 펄스폭에 따른 flatband 전압을 측정된 결과와 trap assisted 터널링 모델을 적용하여 얻은 식(3)으로 부터 계산 이론 곡선을 best fitting시킨 결과는 그림2와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 $V_p=19V$ 이하인 경우 이론곡선은 실험곡선과 잘 일치하였으며, 이때 얻은 fitting 파라미터는 표1과 같다.

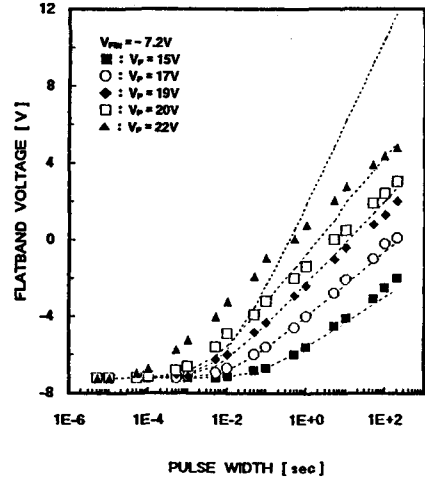


그림2. Trap-assisted 터널링 모델과 실험곡선 비교

표1. trap assisted 터널링모델의 fitting 파라미터

V_p [V]	N_t [m^{-3}]	ϕ_b [eV]	x_m [Å]
15	$4.2 \cdot 10^{25}$	0.55	18.10
17	$4.2 \cdot 10^{25}$	0.55	11.35
19	$4.0 \cdot 10^{25}$	0.53	6.67

그림3은 직접(direct)터널링모델을 적용하여 이론곡선과 실험곡선을 best fitting하여 얻은 결과이다. 그림에서 보는바와 같이 $V_p=15V$ 에서 $V_p=30V$ 까지 전 영역에 걸쳐서 이론곡선과 실험곡선이 잘 일치하였다. 이때 얻은 파라미터는 표2와 같다. 이때 λ 값은 계산결과에 큰 영향을 미쳤으며 펄스전압이 증가할 수록 증가 하였다.

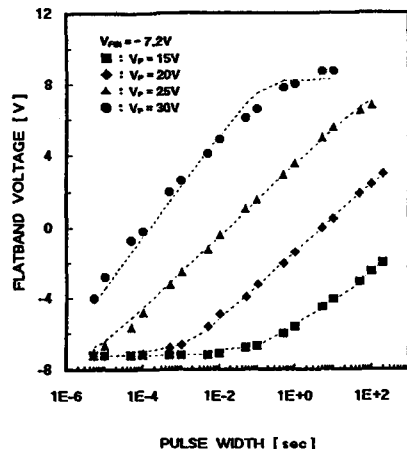


그림3. 직접터널링 모델과 실험곡선 비교

표2. 직접터널링 모델의 fitting 파라미터

V_P [V]	N_t [m^{-3}]	ϕ_t [eV]	x_m [Å]	λ [Å]
15	5.20×10^{23}	2.70	15.2	0.77
20	6.40×10^{25}	2.64	14.4	0.89
25	5.30×10^{25}	2.77	20.8	1.12
30	6.70×10^{25}	2.74	27.1	1.26

그림1, 2, 3으로 부터 주입펄스전압크기가 15V~19V일때는 trap-assisted터널링 모델이, 24V~25V일때는 MFN터널링 모델이 잘 일치 하였고, 특히 직접터널링 모델은 전 펄스전압 영역에서 잘 일치하였다. 또한 표1과 2로부터 트랩핑되는 기억전하의 분포는 펄스전압의 크기에 따라서 달라짐을 알 수 있었다.

IV-2. 기억유지특성

주입조건에 따른 기억유지특성을 조사하기 위해서 초기 flatband전압 이동량 $\Delta V_{FBO} = 8.6V, 9.8V, 12.6V$ 가 되도록 펄스전압 크기 및 펄스폭을 조절하여, 같은 ΔV_{FBO} 갖는 기억전하 주입 조건을 구한 다음 각각의 주입조건에 대하여 10^4 sec 까지 경과시간에 따른 flatband전압을 측정 하였다. 측정결과로부터 각각의 조건에 대한 감소율을 표3과 같다.

표3. 기억전하 주입조건에 따른 감소율

ΔV_{FBO}	8.6V			9.8V			12.6V		
V_P	19V	24V	30V	20V	25V	29V	24V	26V	30V
t_p	20s	0.5s	0.5ms	200s	0.5s	10ms	100s	5s	50ms
DECAY RATE [V/decade]	0.226	0.258	0.263	0.261	0.359	0.374	0.560	0.583	0.627

표3에서 알 수 있듯이 초기 flatband 전압이동량이 클 수록 감소율은 증가하였고, 펄스전압이 크고 펄스폭이 짧은 경우의 주입 조건에 대한 감소율은 펄스전압이 작고 펄스폭이 긴 경우의 감소율 보다 크게 나타났다. 이것으로 보아 펄스전압크기와 펄스폭에 따라 주입되는 기억전하는 다르게 분포하고 있음을 알 수 있다.

V. 결론

1. 주입펄스전압크기가 15V~19V일때는 trap-assisted터널링 모델이, 24V~25V일때는 MFN터널링 모델이 실험곡선과 잘 일치 하였으며, 특히 직접터널링 모델은 전 펄스전압 영역에서 잘 일치하였다.
2. 초기 flatband 전압이동량이 클 수록 감소율은 증가하였으며, 펄스전압이 크고 펄스폭이 짧은 경우의 기억전하 주입조건에 대한 감소율은 펄스전압이 작고 펄스폭이 긴 경우의 감소율 보다 크게 나타났다.
3. 기억전하 주입조건(펄스전압 크기 및 폭)에 따라서 기억트랩은 다른 분포를 보였다.

참고문헌

1. J. J. Chang, "Nonvolatile Semiconductor Memory Device", Proc. of IEEE, Vol.64, p.1037, 1976
2. K. I. Lundström and C. M. Svenson, "Properties of MNOS Structures", IEEE Trans. Electron Dev., Vol. ED-19, p.1280, 1972
3. K. I. Lundström and C. M. Svenson, "Trap-assisted charge injection in MNOS Structure", J. Appl. phys., Vol. 44, No 10, p.4657, 1973
4. A. V. Ferris-Prabhu, "Theory of MNOS Memory Device Behavior", IBM J. Res. Dev., p.125, 1973
5. J. T. Wallmark et al., "Switching and strage characteristics of MIS Transistor", RCA Rev., Vol.30, p.335, 1969
6. Stephen Wolfman, Addison-Wesly Publishing Company, Inc. p.575, 1991