

## 강유전박막의 피로현상을 고려한 MFSFET 소자의 특성

이국표, 강성준, 윤영섭  
인하대학교 전자재료공학과  
Tel. 032-873-1345, Fax. 032-875-5882

### Device Characteristics of MFSFET with the Fatigue of the Ferroelectric Thin Film

Kug Puy Lee, Seong Jun Kang, and Yung Sup Yoon  
Dept. of Electronic Materials and Devices Engineering, Inha University  
Inchon 402-751, Korea  
Tel. 032-873-1345, Fax. 032-875-5882

#### Abstract

Switching behaviour of the ferroelectric thin film and device characteristics of the MFSFET (Metal-Ferroelectric-Semiconductor FET) are simulated with taking into account the accumulation of oxygen vacancies near interface between the ferroelectric thin film and the bottom electrode caused by the progress of fatigue. We show net switching current decreases due fatigue in the switching model. It indicates that oxygen vacancy strongly suppresses polarization reversal. The difference of saturation drain current of the device before fatigue is shown by the dual threshold voltages in  $I_D-V_D$  curve as  $6\text{mA}/\text{cm}^2$  and decreases as much as 50% after fatigue. Our simulation model is expected to play an important role in estimation of the behavior of MFSFET device with various ferroelectric thin films.

#### I. 서론

최근에는 반도체 산업이 발달함에 따라 강유전체 박막을 이용한 비휘발성 메모리소자인 MFSFET

(Metal-Ferroelectric-Semiconductor FET) 소자에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.<sup>[1]</sup>

그러나, 독특한 분극특성을 가지고 있는 강유전체와 FET 소자 사이의 관계를 정량적으로 분석하는 것은 많은 문제점을 내포하고 있다. 특히 강유전체는 피로현상을 가지고 있어서 분극반전에 따른 분극 변화량을 변수로 설정하기 어렵다. 그러나, 본 연구에서는 S. B. Desu 등<sup>[2]</sup>과 J. J. Lee 등<sup>[3]</sup>이 논증한 하부전극 주위의 산소공공층 형성을 근거로 피로현상을 수식화하였다. 또한 강유전체는 Switching 특성을 지니고 있는데<sup>[4]</sup> 이는 MFSFET의 동작원리가 게이트 부분의 분극을 switching 시켜서 전류의 흐름을 제어하는 방식이므로 MFSFET 소자 분석에 있어서 필수적으로 파악해야 한다. 그래서, 산소공공층을 포함시킨 전기적 변위벡터  $D$ 의 시간미분형태를 switching 전류로 변환하는 알고리즘을 활용하여 모델링하였다. 그리고, 위에서 적용한 피로현상의 효과적인 수식화와 switching 특성의 알고리즘을 기초로 얻은 강유전체 변수를 FET 소자의 관련식에 적용하여 MFSFET 소자를 모델링하였다.

#### II. 모델링

피로현상에 따라 산소공공이 강유전체 박막의

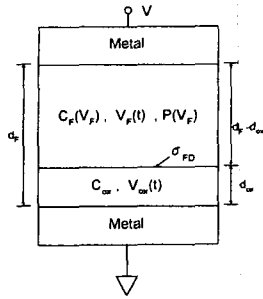


Fig. 1 MFDM capacitor structure

하부전극 계면주위에 축적되어서 dielectric 층을 형성하므로<sup>[2-3]</sup> 산소공공층을 감안한 MFDM (Metal-Ferroelectric-Dielectric-Metal) 구조를 적용하였다.

Switching 특성을 모델링하기 위해 “전기적 변위벡터  $D$ 의 법선 성분은 면 전하가 존재하는 경계를 통하여 불연속적이다”라는 정의를 적용하여 다음식을 유도하였다.

$$\frac{dD(t)}{dt} = \frac{dV(t)}{dt} \cdot \frac{1}{\gamma_1} \left( \frac{\epsilon_0}{d_f} + \frac{d_f - d_{ox}}{d_f} \frac{dP_F(V_F)}{dV_F(t)} \right) \quad (1)$$

$$\gamma_1 = 1 - \frac{d_{ox}}{d_f} + \frac{\epsilon_0}{d_f} \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{ox}} \frac{d_f - d_{ox}}{d_f} \frac{dP(V_F)}{dV_F(t)} \quad (2)$$

여기서,  $d_f$ 는 강유전체층의 두께,  $d_{ox}$ 는 산소공공층의 두께,  $V_F(t)$ 는 강유전체층의 전압,  $P(V_F)$ 는 강유전체의 분극,  $V(t)$ 는 캐패시터의 전체전압,  $C_{ox}$ 는 산소공공층의 캐패시턴스이다.  $P(V_F)$ 는 강유전체 분극을 표현할 때 보편적으로 사용하는 tanh 함수를 사용하였다. Switching 측정에 사용되는 RC 직렬회로에서 부하저항을 통과하는 전류를 구하면 다음과 같다.

$$i(t) = \frac{V_{IN}(t) - V(t)}{R} + \frac{V_{IN}(t)}{R_F + R} \quad (3)$$

여기서,  $V_{IN}(t)$ 는 입력전압,  $A$ 는 전극의 단면적,  $R$ 은 부하저항,  $R_F$ 는 강유전체의 내부저항으로서 누설전류에 관한 항을 고려한 것이다. 그리고, 식 (1)에서 부하저항에 걸리는  $V_{out}(t)$ 를 구하여 전체 강유전체 전압  $V(t)$ 의 시간 미분형태에 관한 식으로 나타낼 수 있다. 그 값을 식 (3)에 적용하여 수치해석적 방법으로 나타내면 switching 전류를 효과적으로 표현할 수 있다.

강유전체 박막을 이용한 소자 중에서 차세대 메모리로 평가되고 있는 MFSFET 소자의 특성을 알아보고, 피로현상에 따른 변화요인을 분석하였다.

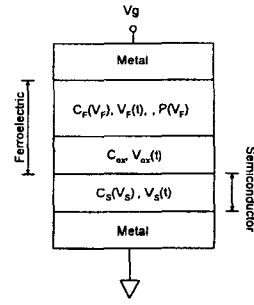


Fig. 2 MFDS capacitor structure

Fig. 2에서 다음식들을 유도할 수 있다.<sup>[5]</sup>

$$C_S(V_S) = \frac{dQ_S(V_S)}{dV_S} \quad (4)$$

$$Q_S(V_S) = -\text{sgn}(V_S) \frac{\sqrt{2}\epsilon_0\epsilon_{S1}kT}{qL_D} F\left(\beta V_S \frac{n_{ps}}{p_{ps}}\right) \quad (5)$$

$$V_G = \Phi_{ms} + V_F + V_{ox} + V_S \quad (6)$$

$$P(V_S, V_F) = -Q_S(V_S) - \frac{\epsilon_0}{d_f} V_F \quad (7)$$

여기서,  $\beta$ 는  $q/(kT)$ ,  $V_S$ 는 반도체의 표면 전위,  $Q_S$ 는  $V_S$ 에 따른 면적당 표면전하,  $L_D$ 는 Debye length,  $C_S$ 는 실리콘반도체의 캐패시턴스,  $C_T$ 는 MFSFET 소자의 전체 캐패시턴스,  $V_G$ 는 게이트 전압,  $V_{ox}$ 는 산소공공층의 전압,  $\Phi_{ms}$ 는 금속과 벌크 실리콘반도체 사이의 일함수이다.

MFSFET 소자의 특성을 분석하기 위해 강반전 구간일 때의 드레인 전류를 조사하였다. N-type FET의 드레인 전류는 다음식으로 표현된다.<sup>[5-8]</sup>

$$I_D = -\frac{Z}{L} \mu_n \int_0^{V_{DS}} Q_n dV \quad (8)$$

여기서,  $Z$ 과  $L$ 은 채널의 너비와 길이,  $\mu_n$ 은 전자의 이동도,  $Q_n$ 은  $Q_S$ 와 실리콘 벌크의 전하 밀도 차이이다. Fig. 2에서 유도된 식을 식 (8)에 대입하여 드레인 전류를 구하면 다음과 같다.

$$I_D = \frac{Z}{L} \mu_n \left( A + \frac{\epsilon_0}{d_f} \left[ (V_G - 2\Phi_F - \Phi_{ms} - V_D) V_{DS} \right] - \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0}{d_f} V_{DS}^2 - \frac{2}{3} \sqrt{2q\epsilon_0\epsilon_{S1}N_A} \left[ (V_{DS} + 2\Phi_F)^{3/2} - (2\Phi_F)^{3/2} \right] \right) \quad (9)$$

여기서,  $A$ 는 다음과 같다.

$$A = \int_0^{V_{DS}} P(V_F) dV \quad (10)$$

식 (9)는 선형영역의 드레인 전류를 표현한 식이고, 포화영역의 드레인 전류는 식 (9)에  $V_{DS}$  대신  $V_{DSsat}$  대입하여 얻을 수 있다.<sup>[5-8]</sup>

### III. 결과 및 토의

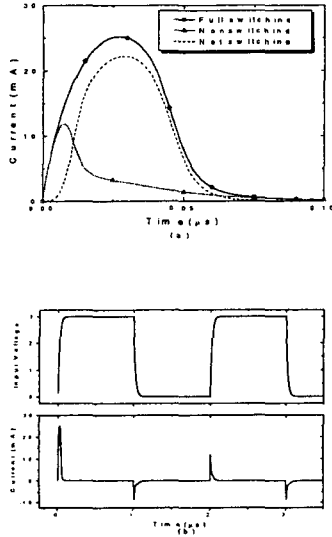


Fig. 3. (a), (b) Ferroelectric switching current simulation without fatigue

Fig. 3 는 식 (3) 을 사용한 switching 전류 모델로서, 자발분극  $P_S$  가  $30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ , 잔류분극  $P_R$  이  $24 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ , 전체 박막의 두께  $d_F$  가  $2000 \text{ \AA}$ , 항전계  $V_C$  가  $1.0\text{V}$ , 산소공공층의 유전상수  $\epsilon_{ox}$  가  $50$ , rising time  $t_{ro}$  가  $20\text{ns}$ , falling time  $t_{fo}$  가  $20\text{ns}$ , load 저항  $R$  이  $50\Omega$ , 전극면적  $A$  가  $16 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$  이다. Fig. 3 (a) 의 모델은 일반적인 강유전체 박막의 switching 곡선과 유사하며<sup>[4]</sup> full switching 전류와 non switching 전류의 차이가 확실하다. 그리고, Fig. 3 (b) 는 rising time 과 falling time 을 고려한 경우로서, 두 양의 입력전압 변화에 따른 switching 전류모델이다. 여기서, 첫 번째 입력전압 (시간:  $0 - 1.0 \mu\text{s}$ ) 은 분극반전을 유도하여 강유전체 박막에 full switching 전류를 발생시키고, 그로인해 생긴 분극반전으로 두 번째 입력전압 ( $2.0 \mu\text{s} - 3.0 \mu\text{s}$ ) 에서는 non switching 전류가 발생된다.

Fig. 4 는 피로현상이 없을 때와 피로현상이 진행되어 산소공공층의 두께가  $10 \text{ \AA}$ ,  $50 \text{ \AA}$ ,  $100 \text{ \AA}$  으로 되었을 때의 switching 전류모델이다. Fig. 4 를 보면 산소공공층 두께의 증가에 따라 switching 전류가 극심하게 감소한다. relative switched charge 는 잔류분극과 비례관계에 있으므로 switching 전류감소는 분극량감소와 분극반전의 약화를 의미한다.

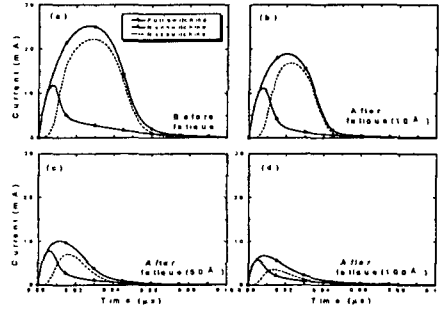


Fig. 4. Ferroelectric switching current simulation before and after fatigue

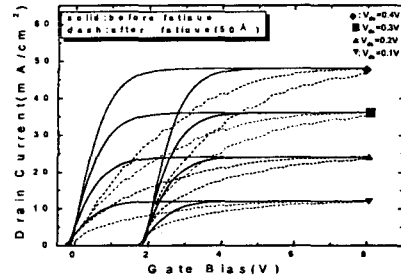


Fig. 5. MFSFET drain current model as a function of Gate bias before and after fatigue

Fig. 5 는  $V_{ox}$  가 각각  $0.1\text{V}$ ,  $0.2\text{V}$ ,  $0.3\text{V}$ ,  $0.4\text{V}$  일 때, 식 (9) 를 수치 해석적 방법으로 나타낸 문턱전압 이상에서  $V_G$  에 따른 드레인 전류모델이다. 여기서, 각 파라미터는  $Z/L$  은  $2$ ,  $\mu_n$  은  $1500.0 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ,  $\epsilon_{Si}$  은  $11.8$  이고 강유전체의 파라미터는 switching 모델과 동일하다. 피로현상이 없는 경우, 분극방향에 따라  $2\text{V}$  의 memory window 를 갖고 드레인 전류는 드레인 전압을 크게 설정할수록 커지며, 게이트 전압의 증가에 따라 증가영역과 포화영역을 갖는다.<sup>[9]</sup> 피로현상으로 산소공공층이  $50 \text{ \AA}$  있는 경우는 게이트 전압에 따라 드레인 전류가 증가하지만, 전류의 왜곡이 심하고 포화영역이 거의 나타나지 않는다.

Fig. 6 은  $V_G$  가  $0\text{V}$  일 때, 식 (9) 를 수치 해석적 방법으로 나타낸 선형영역과 포화영역의 드레인 전류모델이다.

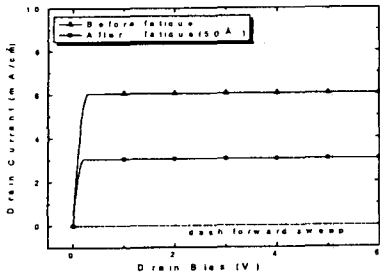


Fig.. 6. MFSFET drain current model as a function of drain bias before and after fatigue

Fig. 6 에서 피로현상이 없는 경우 분극방향에 따른 포화드레인 전류 차이가 약  $6 \text{ mA/cm}^2$  으로서 정보 "0" 과 "1" 사이의 구별이 이루어질 수 있다. 그런데, 피로현상의 진행으로 두께  $50 \text{ \AA}$  의 산소공공층이 형성되었을 때에는 backward sweep 분극방향의 포화영역 드레인 전류가 약 50% 감소되었다. 그리고, forward sweep 분극방향의 경우에는 드레인 전류가 피로현상 여부에 관계없이 흐르지 않는다.

#### IV. 결론

강유전체 박막의 switching 특성과 MFSFET 소자특성을 산소공공의 축적이론을 도입하여 효과적으로 나타내었다. 강유전체 박막의 switching 전류는 피로현상에 의해 생성되는 산소공공층에 따라 급격하게 감소하였는데, 이 사실로부터 산소공공층이 분극반전을 저해하는 요소임을 확인하였다. MFSFET 소자의 시뮬레이션 결과,  $I_D-V_G$  곡선에서 분극방향에 따라  $2 \text{ V}$  의 shift 가 발생하였으며,  $I_D-V_D$  곡선은 backward sweep 과 forward sweep 분극방향에서 확실한 포화드레인 전류 차이를 나타내어 MFSFET 소자가 메모리로서 유망함을 알았다. 그런데, 두께  $50 \text{ \AA}$  의 산소공공층이 축적된 경우는  $I_D-V_D$  곡선에서 backward sweep 분극방향의 포화드레인 전류가 50% 감소하여 MFSFET 소자를 적용하기 위해 피로현상의 극복이 시급한 과제임을 알았다.

본 시뮬레이션은 강유전체의 피로특성을 정량화하여 파악할 수 있으며 MFSFET 소자를 제작하기 전에 그 특성을 검증하는데 응용할 수 있다.

#### 참고문헌

- [1] T. Sumi, "Ferroelectric Nonvolatile Memory Technology and its Applications", *International Conference on Solid State Devices and Materials*, pp. 518~520 (1995)
- [2] I. K. Yoo and S. B. Desu, "Fatigue Parameters of Lead Zirconate Titanate Thin Films", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 243, pp. 323~328 (1992)
- [3] J. J. Lee, T. M. Bhattacharya and S. B. Desu, "Electrode Contacts on PZT Thin Films and Their Influence on Fatigue Properties", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 361, pp. 241~247 (1995)
- [4] H. M. Duiker, P. D. Beale, J. F. Scott, C. A. Paz de Araujo, B. M. Melnick, J. D. Cuchiaro and L. D. McMillan, "Fatigue and Switching in Ferroelectric Memories : Theory and Experiment", *J. Appl. Phys.*, vol. 68, pp. 5783~5791 (1990)
- [5] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, second edition, John Wiley & Sons, New York, Chapter 8 (1981)
- [6] R. R. Pierret, *Field Effect Devices*, second edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., USA, Chapter 2-3 (1990)
- [7] D. K. Schroder, *Advanced MOS Devices*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., USA, Chapter 1 (1987)
- [8] E. S. Yang, *Microelectronic Devices*, McGraw-Hill, Inc., USA, Chapter 9 (1988)
- [9] Y. Fujimori, N. Izumi, T. Nakamura and A. Kamisawa, " $\text{Sr}_2(\text{Ta,Nb})_2\text{O}_7$  Ferroelectric Thin Film for Ferroelectric Memory FET", *Integrated Ferroelectrics*, vol. 21, Num. 1-4, pp. 73~82 (1998)