

論文 2000-37SD-6-4

피로현상을 고려한 강유전박막의 Switching 과 MFSFET 소자의 특성

(Switching Behaviour of the Ferroelectric Thin Film and Device Characteristics of MFSFET with Fatigue)

李國杓*, 姜聲俊**, 尹英燮*

(Kook Pyo Lee, Seong Jun Kang, and Yung Sup Yoon)

요약

피로현상의 진행에 따라 발생하는 하부전극 주위의 산소공공 축적현상을 적용하여 강유전체 박막의 switching 특성과 MFSFET 소자특성을 시뮬레이션하였다. Switching 모델에서 relative switched charge 는 피로현상 전에 0.74 nC 이었으나, 피로가 진행되어 50Å 의 산소공공층이 생성된 후에는 불과 0.15 nC 로서 산소공공층이 분극반전을 강력하게 억제함을 알았다. MFSFET 소자의 모델에서 $C-V_G$ 와 I_D-V_G 곡선은 2V 의 memory window 를 나타내었고, 캐패시턴스 특성에서 축적과 공핍 및 반전 영역은 확실하게 표현되었다. 그리고, I_D-V_D 곡선에서 두 부분의 문턱전압에 의해 나타난 포화드레인 전류차이는 $6\text{mA}/\text{cm}^2$ 이었다. 그러나, 50Å 의 산소공공층이 축적된 후, I_D-V_D 곡선에서 포화 드레인 전류차이는 피로 현상이 없는 경우에 비해 약 50% 감소하여 산소공공층이 소자 적용에 난제임을 확인하였다. 본 모델은 강유전체 박막의 다양한 특성과 임의의 강유전체 박막을 사용한 MFSFET 소자의 동작을 예측하는데 중요한 역할을 할 것으로 판단된다.

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. In our switching model, relative switched charge is 0.74 nC before fatigue, but after the progress of fatigue it reduces to 0.15 nC with the generation of oxygen vacancies. It indicates that the generation of oxygen vacancies strongly suppresses polarization reversal. $C-V_G$ and I_D-V_G curves in our MFSFET device model exhibit the memory window of 2 V and show the accumulation, the depletion, and the inversion regions in capacitance characteristic clearly. 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. Decrease of the difference of saturation drain currents by fatigue implies that the accumulation of oxygen vacancies with the fatigue should be avoided in the device application. Our simulation model is expected to play an important role in estimation of the behavior of MFSFET device with various ferroelectric thin films.

* 正會員, 仁荷大學校 電子材料工學科
(Dept. of Electronic Materials & Device Engineering,
Inha Univ.)

** 正會員, 麗水大學校 半導體·應用物理學科 專任講師

(Dept. of Semiconductor and Applied Physics, Yosu
National Univ.)

※ 본 연구는 한국과학재단 '99 핵심전문연구 (과제번호 : 981-0907-026-2) 지원에 의해 수행되었습니다.
接受日字: 1999年10月2日, 수정완료일: 2000年3月23日

I. 서론

최근에 반도체 산업이 급격하게 발달함에 따라 강유전체 박막 자체의 고유특성인 분극반전과 hysteresis 현상을 이용하는 비휘발성 메모리에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 강유전체 박막을 이용하여 외부전기장 없이 정보를 기억할 수 있는 비휘발성 메모리소자인 MFSFET (Metal-Ferroelectric-Semiconductor FET) 소자에 대한 연구가 이루어지고 있어 강유전체 박막의 중요성이 더욱 증가하고 있다. MFSFET 소자는 게이트 강유전체의 분극을 switching 시켜서 전류의 흐름을 제어하는 방식의 소자로서, 기존의 비휘발성 메모리인 EEPROM이나 flash EEPROM 등에 비해 고집적도, 고속구동, 고내구성, 내방사선성, 저소비전력화를 실현시킬 수 있어 이상적인 메모리로서 각광받고 있다.^[1-3] 그러나, 강유전체를 이용한 MFSFET 소자는 반복되는 읽기/쓰기 횟수가 증가함에 따라 분극값이 감소하는 피로현상이 존재하여 MFSFET의 실용화에 커다란 장애가 되고 있다.

MFSFET 소자를 실제적인 메모리 소자에 적용하기 위해서는 switching 특성을 비롯하여 드레인 전류와 캐패시턴스-전압 특성과 이들 특성들이 피로현상에 대해 어떻게 변화하는지를 명확하게 정량적으로 분석하고 모델링하는 것이 필수적인 일이다. 그러나, 강유전체는 독특한 분극특성을 가지고 있어 수치적으로 표현하기 어려워서, 강유전체의 switching 특성과 강유전체와 FET 소자 사이의 관계를 정량적으로 모델링하는 것에 많은 문제점이 있고 특히, 강유전체는 피로현상 가지고 있기 때문에 분극반전에 따른 분극 변화량을 변수로 설정해서 MFSFET 소자를 모델링하기는 더욱 힘들다. 따라서, 피로현상을 적용한 MFSFET 소자의 모델링에 대한 연구는 국내외 적으로 극히 미흡한 실정 이어서 MFSFET 소자의 개발이 늦추어 지고 있다.

본 연구에서는 S. B. Desu 등^[3]과 J. J. Lee 등^[4]이 논증한 하부전극 주위의 산소공공층 형성을 근거로 피로현상을 수식화 하였으며 강유전체의 switching 특성은 RC 직렬회로에 강유전체 캐패시터를 적용시켜, 분극특성을 switching 전류형태로 유도하였다. 이를 위해, 산소공공층을 포함시킨 전기적 변위벡터 D 의 시간미분형태를 switching 전류로 변환하는 알고리즘을 활용

하여 모델링하였다. MFSFET 소자를 모델링하기 위해서, 위에서 적용한 피로현상의 효과적인 수식화와 switching 특성의 알고리즘을 기초로 얻은 강유전체 변수를 MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor FET) 소자의 관련식에 적용하였다. MFSFET 분석은 드레인 전류와 캐패시턴스-전압 특성에 초점을 맞추어서, 메모리소자로 활용이 가능한지를 알아보았고, 피로현상에 의한 이들 특성의 변화를 조사하여 피로현상이 MFSFET 소자에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

2. 모델링

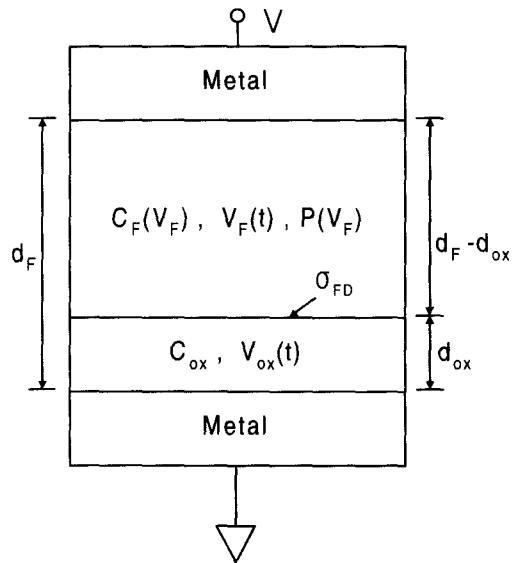


그림. 1. MFDM 캐패시터의 구조
Fig. 1. MFDM capacitor structure.

피로현상에 따라 산소공공이 강유전체 박막의 하부전극 계면주위에 축적되어서 dielectric 층을 형성한다는 이론^[3, 4]을 적용하여, 강유전체 박막에 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 정의^[5]를 적용하여 다음식을 유도하였다.

$$\sigma_{FD} = \epsilon_0 \frac{V_F(t)}{d_F - d_{ox}} + P(V_F) - \epsilon_o \epsilon_{ox} \frac{V_{ox}(t)}{d_{ox}} \quad (1)$$

$$V_F(t) + V_{ox}(t) = V(t) \quad (2)$$

여기서, σ_{FD} 는 강유전체와 산소공공층 사이의 표면 전하밀도, ϵ_{ox} 는 산소공공층의 비유전률, ϵ_o 는 진공층의 비유전률, d_F 는 강유전체층의 두께, d_{ox} 는 산소공공층의 두께, $V_F(t)$ 는 강유전체층의 전압, $V_{ox}(t)$ 는 산소공공층의 전압, $P(V_F)$ 는 강유전체의 분극, $V(t)$ 는 캐패시터의 전체전압이다. 그리고 $P(V_F)$ 는 강유전체 분극을 표현하기 위해서 일반적으로 사용하는 \tanh 함수를 이용하였다.^[6, 7] 위의 식을 정리하면 $V_F(t)$ 의 표현식을 유도할 수 있고, 그 값을 시간으로 미분하여 정리하면 다음식을 유도할 수 있다.

$$\frac{dV_F(t)}{dt} = \frac{dV(t)}{dt} \cdot \frac{d_F - d_{ox}}{d_F \gamma_1} \quad (3)$$

$$\gamma_1 = 1 - \frac{d_{ox}}{d_F} + \frac{\epsilon_o}{d_F} \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{ox}} \frac{d_F - d_{ox}}{d_F} \frac{dP_F(V_F)}{dV_F(t)} \quad (4)$$

여기서, C_{ox} 는 산소공공층의 캐패시턴스이고 식 (3) 을 전기적 전위벡터 $D(t)$ 에 대입하여 정리하면 다음 식을 만들 수 있다.

$$\frac{dD(t)}{dt} = \frac{dV(t)}{dt} \cdot \frac{1}{\gamma_1} \left(\frac{\epsilon_o}{d_F} + \frac{d_F - d_{ox}}{d_F} \frac{dP_F(V_F)}{dV_F(t)} \right) \quad (5)$$

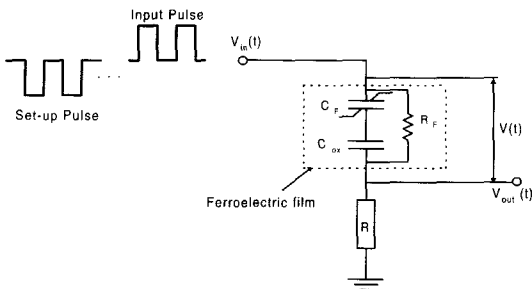


그림 2. 측정에 사용된 입력 pulse 파형과 직렬 RC 회로의 개략도

Fig. 2. Input pulse wave form in pulse switching measurement and schematic diagram of the Series RC circuit

식 (5) 에서 표현한 전기적 변위벡터 $D(t)$ 의 시간 미분형태를 switching 특성에 적용하기 위해서는 switching 측정에 사용되는 회로에서 변수를 얻어야 한다. Fig. 2 에 switching 측정을 위해 일반적으로 사용되는 RC 직렬회로를 나타내었다. RC 직렬회로의 동작

을 살펴보면, 입력펄스는 두 set-up 펄스에 의해서 초기화되고, switching 특성은 강유전체 박막에 직렬로 연결된 부하저항 (R) 양단에 흐르는 전류로 분석할 수 있다. Fig. 2 에 표현된 출력전압 $V_{out}(t)$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{out}(t) = V_{in}(t) - V(t) = A \cdot R \cdot \frac{dD(t)}{dt} \quad (6)$$

여기서, $V_{in}(t)$ 는 입력전압, A 는 전극의 단면적, R 은 부하저항이다. 식 (5) 를 식 (6) 에 대입하여 정리하면 전체 강유전체 전압 $V(t)$ 의 시간 미분형태에 관한 식으로 나타낼 수 있고, 그 식을 수치 해석적 방법을 사용하여 표현하면, 시간에 따른 강유전체 전체전압 $V(t)$ 를 구할 수 있다. 그 값을 사용하여 load 저항을 통과하는 전류를 구하면 다음과 같다.

$$i(t) = \frac{V_{in}(t) - V(t)}{R} + \frac{V_{in}(t)}{R_F + R} \quad (7)$$

여기서, R_F 는 강유전체의 내부저항으로서 누설전류에 관한 항을 고려한 것이다. 그리고, 입력전압 $V_{in}(t)$ 는 최대 입력전압까지 도달하기 위하여 걸리는 시간인 rising time 을 고려하여 다음과 같이 표현하였다.

$$V_{in}(t) = V_I \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{t_{ro}}\right) \right) \quad (8)$$

여기서, V_I 는 최대입력전압, t_{ro} 는 rising time 이다. 이와 유사하게 최대입력전압 V_I 가 0V 로 될 때까지 걸리는 시간인 falling time 은 다음 식을 사용하여 표현하였다.

$$V_{in}(t) = V_I \cdot \exp\left(\frac{t_e - t}{t_{fo}}\right) \quad (9)$$

여기서, t_{fo} 는 falling time 이고, t_e 는 유지시간이다. 위에서 고려한 모든 변수를 식 (7) 에 적용하여 수치해석적 방법으로 나타내면 switching 전류를 효과적으로 표현할 수 있다.

피로현상에 관한 switching 특성을 바탕으로, 강유전체 박막을 이용한 소자 중에서 차세대 메모리로 평가되고 있는 MFSFET 소자의 특성을 알아보고, 피로현상에 따른 변화요인을 분석하였다. Fig. 3 에서 전체 캐패시턴스를 구하면 다음과 같다.^[8]

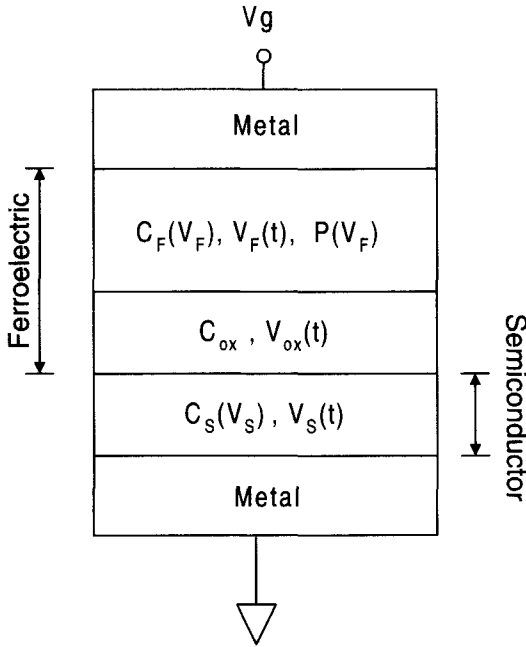


그림.3. MFDS 캐패시터의 구조
Fig. 3. MFDS capacitor structure.

$$C_S(V_S) = \frac{dQ_S(V_S)}{dV_S} \quad (10)$$

$$Q_S(V_S) = -\text{sgn}(V_S) \frac{\sqrt{2}\epsilon_0\epsilon_{si}kT}{qL_D} F\left(\beta V_S, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right) \quad (11)$$

$$F\left(\beta V_S, \frac{n_{po}}{p_{po}}\right) = \left[e^{-\beta V_S} + \beta V_S - 1 + \frac{n_{po}}{p_{po}} (e^{\beta V_S} - \beta V_S - 1) \right]^{1/2} \quad (12)$$

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_F(V_F)} + \frac{1}{C_S(V_S)} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (13)$$

여기서, β 는 $q/(kT)$, V_S 는 반도체의 표면전위, Q_S 는 V_S 에 따른 면적당 표면전하, L_D 는 Debye length, p_{po} 와 n_{po} 는 각각 p-형 기판의 정공, 전자 평형 밀도, k 는 볼츠만 상수, T 는 절대온도, N_A 는 기판의 p-형 농도, ϵ_{si} 는 실리콘의 비유전률, q 는 전하량, C_S 는 실리콘반도체의 캐패시턴스, C_{ox} 는 산소 공공층의 캐패시턴스, C_T 는 MFSFET 소자의 전체 캐패시턴스이다. 식 (13) 을 수치해석적으로 정리하면 MFSFET 소자의 캐패시턴스를 구할 수 있다.

다음으로 MFSFET 소자의 각 부분별 전압을 구하기 위해 Fig. 3 으로 부터 다음식을 유도하였다.

$$V_G = \Phi_{ms} + V_F + V_{ox} + V_S \quad (14)$$

$$P(V_S, V_F) = -Q_S(V_S) - \frac{\epsilon_0}{d_f} V_F \quad (15)$$

여기서, V_G 는 게이트 전압, Φ_{ms} 는 금속과 벌크 실리콘반도체 사이의 일함수이다. 식 (1), (2), (10), (11), (12), (14), (15) 을 정리하면 V_G 에 따른 V_S , V_F , V_{ox} 의 상관관계를 알 수 있다. 각 부분별 전압을 활용하여 피로현상에 관한 MFSFET 소자의 특성을 분석하기 위해 우리는 문턱전압 이상 즉 강반전 구간 일 때의 드레인 전류를 조사하였다. 이 때의 드레인 전류는 포화드레인 전압 V_{Dsat} 이하에서 형성되는 선형 구역과 포화 드레인 전압 이상에서 나타나는 포화 구역으로 나뉘게 되는데, n-type FET 의 드레인 전류는 다음식으로 표현된다.^[8-11]

$$I_D = -\frac{Z}{L} \mu_n \int_0^{V_{DS}} Q_n dV \quad (16)$$

식 (16) 의 파라미터를 살펴보면 다음과 같다.

$$Q_n(y) = Q_S - Q_B \quad (17)$$

$$Q_B = -\sqrt{2q\epsilon_0\epsilon_{si}N_A V_S} = -\sqrt{2q\epsilon_0\epsilon_{si}N_A(2\Phi_F + V(y))} \quad (18)$$

여기서, Z 는 채널의 너비, L 은 채널의 길이, μ_n 은 전자의 이동도, V_{DS} 는 소스와 드레인 사이의 전위, Q_B 는 실리콘 벌크의 전하밀도, Φ_F 는 p-형 실리콘의 페르미 준위, $V(y)$ 는 소스 전극과 임의의 지점 y 사이에 해당하는 역 바이어스이다. 여기서, 식 (1), (2), (10), (11), (12), (14), (15), (17), (18) 를 식 (16) 에 대입하여 드레인 전류를 구하면 다음과 같다.

$$I_D = \frac{Z}{L} \mu_n \left(\int_0^{V_{DS}} P(V_F) dV + \frac{\epsilon_0}{d_f} [(V_G - 2\Phi_F - \Phi_{ms} - V_{ox})V_{DS} - \frac{1}{2} V_{DS}^2] - \frac{2}{3} \sqrt{2q\epsilon_0\epsilon_{si}N_A} [(V_{DS} + 2\Phi_F)^{3/2} - (2\Phi_F)^{3/2}] \right) \quad (19)$$

S. L. Miller 등이^[12] 논증한 MFSFET 이론에서 강유전체층의 캐패시턴스를 일정하게 근사화한 것에 비하여 식 (19) 는 분극값의 변화를 이용하여 강유전체층의 전압에 따른 캐패시턴스의 차이를 고려하였다. 그리고 포화드레인 전압 V_{DSat} 은 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{Dsat} = V_G - V_T \tag{20}$$

여기서, 문턱전압 V_T 는 $V_S=2\Phi_F$ 일 때의 게이트 전압으로 식 (14) 을 활용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_T = \Phi_{ms} + 2\Phi_F + V_{ox}(V_S=2\Phi_F) + V_F(V_S=2\Phi_F) \tag{21}$$

식 (19) 는 선형영역의 드레인 전류를 표현한 식이고, 포화영역의 드레인 전류는 식 (19) 에 V_{DS} 대신 V_{Dsat} 대입하여 얻을 수 있다.^[8-11] 그와 같은 방법으로 식 (19) 를 활용하면 임의의 드레인 전압 또는 게이트 전압에서 드레인 전류를 효과적으로 나타낼 수 있다.

3. 결과 및 논의

표 1. switching 시뮬레이션에서 사용된 파라미터

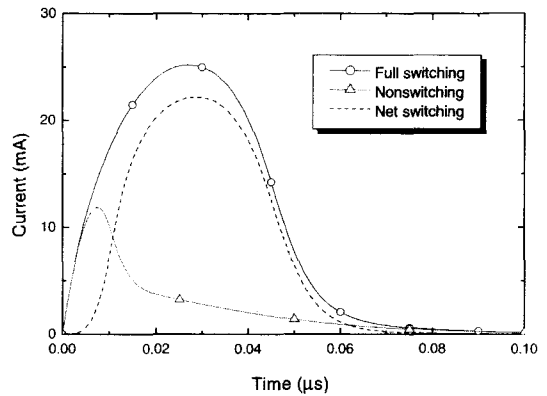
Table 1. Parameters for switching simulation.

Element	P_s	P_R	df	V_C	ϵ_{ox}	t_{ro}
Value	$30 \mu C/c$ m^2	$24 \mu C/c$ m^2	2000 \AA	1.0V	50	20ns
Element	t_{fo}	V_I	t_c	R	R_F	A
Value	20ns	3V	$1 \mu s$ and $3 \mu s$	50Ω	$1M \Omega$	$16 \times 10^{-6} c$ m^2

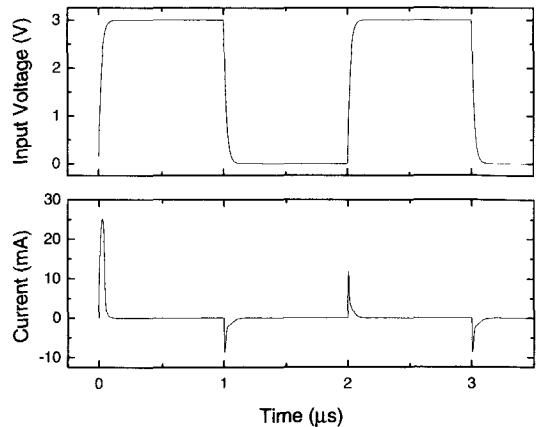
Fig. 4 는 table 1 의 파라미터를 식 (7) 에 적용하여 나타낸 switching 전류모델이다. 여기서, full switching 전류는 식 (5) 의 $P_F(V_F)$ 값이 입력전압 0V 에서 음의 분극값을 갖는 forward sweep 분극상태에 있는 경우로서, 양의 입력전압에 의해 유도된 분극반전 현상으로 생성된 전류이고 non switching 전류는 반대로 $P_F(V_F)$ 값이 입력전압 0V 에서 양의 분극값을 갖는 backward sweep 분극상태에 있어서 분극반전현상이 유발되지 않을 경우의 전류이다. 그리고, net switching 전류는 full switching 전류와 non switching 전류의 차이이다.

Fig. 4 (a) 의 모델은 full switching 전류와 non switching 전류의 차이가 확실하고, 일반적인 강유전체 박막의 switching 곡선과 유사하다.^[13-14] 그리고, Fig. 4 (b) 는 식 (11), (12) 의 rising time 과 falling time 을 고려한 경우로서, 두 양의 입력전압 변화에 따른

switching 전류모델이다. Fig. 2 과 같이 처음 set-up 과정에서 이미 forward sweep 분극방향으로 초기화된 강유전체 박막을 대상으로 입력전압을 변화시켜가며 switching 전류를 모델링하였다. 여기서, 첫 번째 입력 전압 (시간: 0 - 1.0 μs) 은 분극반전을 유도하여 강유전체 박막에 full switching 전류를 발생시키고, 그로 인해 생긴 분극반전으로 강유전체 박막은 backward sweep 분극방향으로 바뀌게 되므로 두 번째 입력전압 (2.0 μs - 3.0 μs) 은 분극반전을 유도하지 못하고, non switching 전류를 발생시킨다.



(a)



(b)

그림. 4. (a) 피로현상이 없는 강유전체 박막의 스위칭 전류 시뮬레이션과 (b) 인가전압에 따른 스위칭전류

Fig. 4. (a) Ferroelectric switching current simulation without fatigue and (b) applied voltage (top) and resultant switching current (bottom).

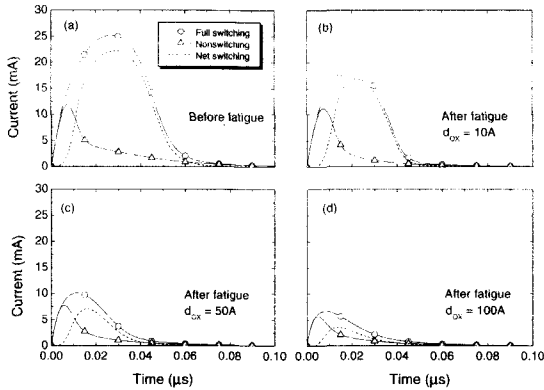


그림 5. 피로현상 전과 후의 switching 전류 모델 : (a) 피로현상 전, (b) 피로현상 후 (10Å), (c) 피로현상 후 (50Å), (d) 피로현상 후 (100Å)
 Fig. 5. Ferroelectric switching current simulation before and after fatigue : (a) before fatigue, (b) after fatigue (10Å), (c) after fatigue (50 Å), (d) after fatigue (100Å).

Fig. 5 는 피로현상이 없을 때와 피로현상이 진행되어 산소공공층의 두께가 10, 50, 100Å 으로 되었을 때의 switching 전류모델이다. Fig. 5 를 보면 산소공공층 두께의 증가에 따라 switching 전류가 극심하게 감소하는데 특히 full switching 전류가 non switching 전류보다 감소비율이 심하다. 보다 정확하게 산소공공층의 두께에 따른 각 switching 전류 변화값을 분석하기 위해, switching 곡선의 폐면적이 switched charge 양과 동일하다는 사실을 이용하여 각 곡선의 폐면적을 수치 해석적으로 구하고, 그 값을 table 2 에 나타내었다.

표 2. 피로현상 전과 후의 switched charge
 Table 2. Switched charge before and after fatigue.

Switching State	Switched Charge (nC)			
	Before Fatigue	After Fatigue		
		Oxygen Vacancy Thickness		
		10Å	50Å	100Å
Full Switching	1.04	0.62	0.30	0.20
Non Switching	0.28	0.20	0.15	0.12
Net Switching	0.76	0.42	0.15	0.08

Table 2 에 표현된 것처럼 피로현상이 진행됨에 따라 full switched charge 와 non switched charge 는

모두 감소한다. 그러나, non switched charge 는 full switched charge 보다 감소비율이 작고, 그 값이 적기 때문에 full switched charge 와 non switched charge 의 차이인 relative switched charge 는 full switched charge 의 양에 지배적인 영향을 받으면서 감소한다.

Relative switched charge 를 분극변화 측면으로 살펴보면, 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$Q_{SW} = 2P_R \times A \tag{22}$$

여기서, Q_{SW} 는 relative switched charge 이고, 식 (22) 를 적용하여 피로현상이 없는 경우와 산소공공층이 10, 50, 100Å 으로 증가하는 경우, 잔류분극 값을 구하면 각각 24, 13, 5, $2.5 \mu C/cm^2$ 이다. 잔류분극과 relative switched charge 는 분극반전에 따라 그 크기가 결정되므로 위의 결과는 산소공공층이 강유전체 박막의 정상적인 분극반전을 방해해서 나타난 것이라고 추론할 수 있다.

위의 분석을 근거로 하면 피로현상에 따른 산소공공층 누적은 강유전체 박막을 이용한 비휘발성 메모리의 동작에 직접적인 영향을 줄뿐만 아니라, 강유전체 박막의 분극반전을 방해하는 현상에 의해서 강유전체를 응용한 다양한 소자들의 동작에도 많은 문제점을 노출시킬 것으로 판단된다.

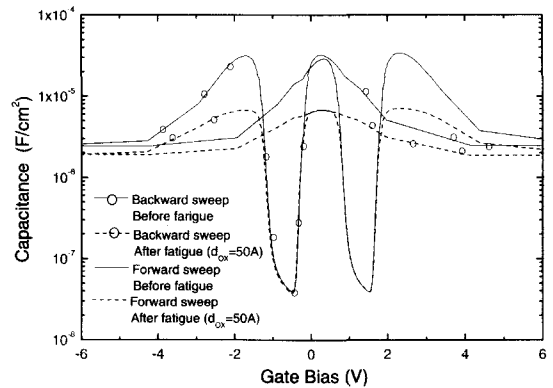


그림 6. 피로현상 전과 후에 MFS 캐패시터의 저주파수 영역 캐패시턴스
 Fig. 6. Low-frequency capacitance of MFS capacitor as a function of gate bias before and after fatigue.

다음으로 MFSFET 의 특성을 살펴보았는데 캐패시턴스와 드레인 전류의 관점에서 분석하였다. 먼저 식

(13) 을 사용하여 MFSFET 의 전체 캐패시턴스를 조사하였는데 Fig. 6 에 그 모델이 소개되어 있다. 식 (13) 은 저주파수 영역에서 타당한 식으로 forward sweep 과 backward sweep 분극방향에 따라 다른 캐패시턴스를 갖는다. Fig. 6 을 살펴보면, forward sweep 분극방향이 backward sweep 분극방향에 비하여 게이트 전압에 대해 오른쪽으로 약 2V 정도 이동되었음을 알 수 있다. 그리고, MFSFET 의 전체 캐패시턴스가 줄어들어 생성되는 깊은 구멍형태의 곡선이 각 분극방향에 따라 존재하는데, 그것은 실리콘 반도체가 공핍영역 (depletion resion) 에 해당되어 발생하는 부분이다. 피로현상이 없는 경우, 각 분극방향마다 축적영역 (accumulation region), 반전 영역 (inversion region) 의 캐패시턴스가 크게 증가하게 되는데, 이는 MFSFET 의 각 부분별 캐패시턴스 중에서 강유전체층의 캐패시턴스 $C_F(V_F)$ 가 이 게이트 전압에서 큰 값을 갖기 때문에 나타나는 현상이다. 반면에, 피로현상에 의해 산소공공층이 50Å 형성되어 있는 경우는 축적과 반전 영역의 캐패시턴스가 최대 3×10^{-5} 에서 7×10^{-6} F/cm² 이하로 줄어들었다. 여기서, 특히 반전영역의 캐패시턴스의 감소는 channel 형성의 감소를 의미하므로, 50Å 의 산소공공층이 있는 MFSFET 소자는 channel 과 드레인 전류 형성에 많은 문제가 있을 것으로 파악된다.

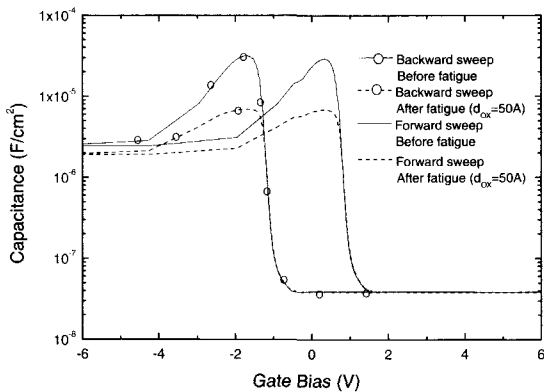


그림 7. 피로현상 전과 후에 MFS 캐패시터의 고주파수 영역 캐패시턴스

Fig. 7. High-frequency capacitance of MFS capacitor as a function of gate bias before and after fatigue.

저주파수 영역과 달리 MFSFET 에서 고주파수 영역은 캐패시턴스 곡선의 변형이 일어난다. 식 (13) 에서

C_{ox} , $C_F(V_F)$, $C_S(V_S)$ 는 모두 주파수에 영향을 받는데 본 논문에서는 C_{ox} 와 $C_F(V_F)$ 의 주파수에 관한 영향이 $C_S(V_S)$ 에 비하여 극히 적으므로, $C_S(V_S)$ 만을 고려하였다. 일반적으로 반전영역일 경우, 고주파수 영역에서 반도체의 표면전하 Q_S 는 표면전위 V_S 에 따라 증가하는 양이 미약하므로, 공핍영역에서 반전영역까지 식 (13) 의 $C_S(V_S)$ 항이 일정하게 유지되는 형태로 수정하였다.^[8-11]

Fig. 7 은 식 (13) 에서 $C_S(V_S)$ 에 관한 항을 고주파수 영역에 맞게 수정한 캐패시턴스 모델이다. Fig. 7 에서 memory window 는 약 2V 로서 메모리소자로서의 활용 가능성이 충분하고, 공핍영역에서 반전영역이 되는 구간의 캐패시턴스가 고정되어 있다는 사실을 제외하고 저주파수 영역의 캐패시턴스와 동일한 특성을 갖는다.

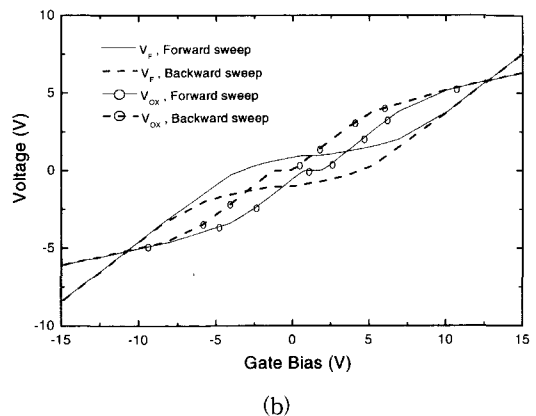
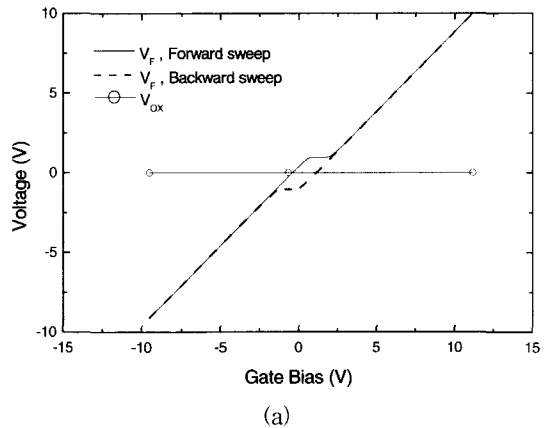


그림 8. MFSFET 에서 (a) 피로 전과 (b) 피로 후의 강유전체 층과 산소공공층의 전압

Fig. 8. Voltages of ferroelectric layer and oxygen vacancy layer (a) before and (b) after fatigue in MFSFET.

Fig. 8 은 식 (1), (2), (10), (11), (12), (14), (15) 을 정리하여 V_G 에 따른 V_F 와 V_m 의 상관관계를 나타낸 그림이다. Fig. 8 (a) 는 산소공공층이 없는 MFSFET 소자의 강유전체층 전압분포이고 Fig. 8 (b) 는 50Å 의 산소공공 층이 포함된 경우의 전압분포이다. Fig. 8 (a) 에서는 backward sweep 분극방향에서 약 -1.5~0 V, forward sweep 분극방향에서 약 0.5~2.0 V 의 게이트 전압을 제외하고 강유전체층 전압이 게이트 전압의 증가에 따라 선형적으로 증가하는데, 이는 게이트 전압이 강유전체층에 정확하게 전달된다는 사실을 나타내는 것이다. Fig. 8 (a) 에서 게이트 전압 증가에도 불구하고 강유전체층 전압이 일정하게 유지되는 구간이 생기는 이유는 반도체의 표면전위 V_S 가 증가하는 영역이기 때문이다. Fig. 8(a) 와 달리 Fig. 8 (b) 에서는 다른 양상의 전압분배가 일어나는데, 피로현상의 진행에 따라 형성되는 산소공공층이 강유전체층에 제공되어야 할 전압의 상당 부분을 점유함으로써 강유전체층 전압의 증가가 둔화되었다.

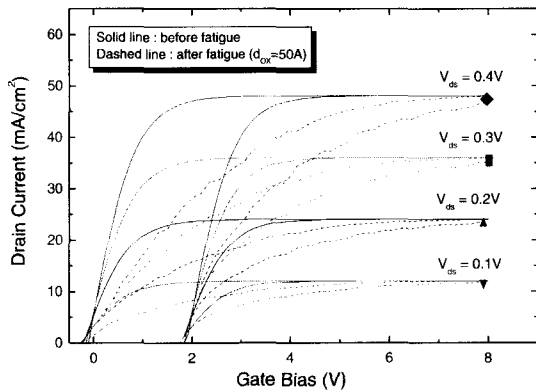


그림 9. 피로현상 전 후에 게이트 전압에 따른 MFSFET 의 드레인 전류 모델
Fig. 9. MFSFET drain current model as a function of gate bias before and after fatigue

Fig. 9 는 V_{DS} 가 각각 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 V 일 때, 식 (19) 를 수치 해석적 방법으로 나타낸 문턱전압 이상에서 V_G 에 따른 드레인 전류모델이다. 여기서, Z/L 은 2, μ_n 은 $1500.0\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, N_A 은 $1.0\times 10^{16}\text{cm}^{-3}$, ϵ_{si} 은 11.8 이고 강유전체의 파라미터는 switching 모델과 동일하다.

식 (21) 에 표현된 $V_m(V_S=2\phi_F)$ 의 값은 극히 작으므로 문턱전압 V_T 는 피로현상 전후의 값이 거의 같

게 나타나는데, 그 값을 수치해석적으로 계산하면 문턱 전압이 forward sweep 와 backward sweep 분극방향에서 각각 1.66 V 와 -0.34 V 이다. Fig. 9 의 드레인 전류에서 문턱전압은 각 분극방향에 따라 수치적으로 계산한 문턱전압과 거의 일치하고 드레인 전류는 드레인 전압을 크게 설정할수록 커지며, 게이트 전압의 증가에 따라 증가영역과 포화영역을 갖는다. 피로현상이 없는 경우, 드레인 전류는 Fig. 6 과 Fig. 7 의 캐패시턴스 모델처럼 약 2V 의 memory window 를 갖는데 이것은 분극방향에 따른 항전압의 차이인 2V 와 정확하게 일치하는 값이다.

피로현상이 없는 경우, 확실한 포화영역과 memory window 를 가지며 증가영역과 포화영역을 나타내는 일반적인 I_D-V_G 곡선형태를 갖는다.^{[15][16]} 반면에 산소공공층이 50Å 축적되어 있는 경우는 게이트 전압에 따라 드레인 전류가 증가하지만, 전류의 왜곡이 심하고 포화영역이 거의 나타나지 않는다. 이와 같은 현상도 산소공공층의 전압차단 혹은 점유에 의해 확실한 channel 이 형성되지 않아 발생하는 것으로 MFSFET 가 메모리로서 역할을 하기 위해 피로현상이 심각한 문제임을 보여준다.

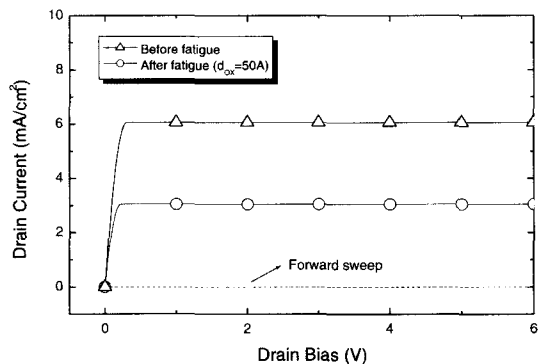


그림 10. 피로현상 전 후에 드레인 전압에 따른 MFSFET 의 드레인 전류 모델
Fig. 10. MFSFET drain current model as a function of drain bias before and after fatigue.

MFSFET 소자는 강유전체 박막의 분극방향에 따라 드레인 전류차이가 발생한다는 사실을 응용한 소자로서 위와 아래의 분극 방향을 각각 정보 '1' 또는 '0' 로 설정하는 방식을 취한다. 그러므로 MFSFET 의 드레인 전류 특성을 파악할 때, 게이트 전압 V_G 는 0V 로 설정하여 분극반전 즉 정보의 파괴가 일어나지 않게

해야 한다. Fig. 10 은 V_G 가 0V 일 때, 식 (19) 를 수치 해석적 방법으로 나타낸 선형영역과 포화영역의 드레인 전류모델이다. Fig. 10 에서 드레인 전류는 0V 의 게이트 전압 V_G 가 문턱전압 V_T 보다 큰 backward sweep 분극방향에서 발생하고 forward sweep 분극방향에서는 드레인 전류가 발생하지 않는다. 그리고, 포화 드레인 전압 V_{Dat} 은 forward sweep 과 backward sweep 분극방향에서 각각 $-1.66V$, $0.34V$ 으로 backward sweep 분극방향만 의미가 있다.

Fig. 10 에서 피로현상이 없는 경우 분극방향과 문턱 전압 따른 포화드레인 전류 차이가 약 $6mA/cm^2$ 으로서 정보 "0" 과 "1" 사이의 구별이 가능하다. 그런데, 두께 50Å의 산소공공층이 형성되었을 때에는 backward sweep 분극방향의 포화영역 드레인 전류가 약 50% 감소되었다. 위 사실은 피로현상에 의해 형성된 산소공공층이 MFSFET 소자의 정보 저장을 저해하는 요소임을 의미한다.

IV. 결 론

피로현상에 따른 강유전체 박막의 switching 특성과 MFSFET 소자특성을 산소공공의 축적이론을 도입하여 효과적으로 나타내었다. 강유전체 박막의 switching 전류는 피로현상에 의해 생성되는 산소공공층에 따라 급격하게 감소하였는데, switched charge 측면에서 보면 피로현상이 없는 박막에서 relative switched charge 가 0.74 nC 인 반면, 산소공공층 두께가 10, 50, 100Å 으로 증가함에 따라 relative switched charge 가 0.42, 0.15, 0.08 nC 로 나타났다. 이 사실로부터 산소공공층이 분극반전을 저해하는 요소임을 확인하였고, 산소공공층이 분극반전을 응용한 강유전체 소자적용에 문제점이 있음을 지적하였다. MFSFET 소자의 시뮬레이션 결과, 고주파와 저주파의 캐패시턴스 특성에서 축적, 공핍, 반전영역이 명확하게 표현되었고, memory window 가 항전압의 차이에 따라 2V 로 나타났다. 특히, 고주파수 대역은 공핍영역에서 반전영역까지 $C_S(V_S)$ 향이 일정하게 유지되는 형태로 수정하여 효과적으로 표현하였다. 그리고 드레인전류 특성에서 I_D-V_G 곡선은 증가영역과 포화영역이 뚜렷하게 표현되었으며 I_D-V_D 곡선에서는 분극방향에 따라 $6mA/cm^2$ 의 확실한 포화드레인 전류 차이를 보여 MFSFET 소자가 메모리로서 유

망함을 입증하였다. 그런데, 피로현상에 따라 두께 50Å의 산소공공층이 생성된 경우에는 반전영역의 캐패시턴스가 최대 3×10^{-5} 에서 $7 \times 10^{-6} F/cm^2$ 이하로 줄어들어 MFSFET 의 channel 형성이 산소공공층과 직접적으로 관련되어 감소됨을 알았으며, 이에 따라 I_D-V_G 곡선의 드레인전류는 심한 왜곡을 보였으며 I_D-V_D 곡선의 포화드레인 전류는 backward sweep 분극방향에서 50% 이상 감소하였다. 이는 MFSFET 소자를 실제 메모리 소자에 적용하기 위해서 피로현상이 중요하게 고려되어야할 요소임과 동시에 시급하게 극복해야할 과제임을 보여주는 것이다.

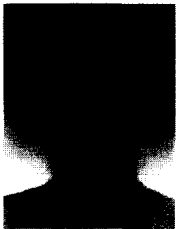
본 시뮬레이션으로 강유전체의 피로특성을 정량화하여 파악할 수 있으며, MFSFET 소자를 제작하기 전에 그 특성을 검증하는데도 유용하게 사용될 수 있으리라고 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] T. Sumi, "Ferroelectric Nonvolatile Memory Technology and its Applications", *International Conference on Solid State Devices and Materials*, pp. 518~520, 1995.
- [2] S. Sinharoy, H. Buhay, D. R. Lampe and M. H. Francombe, "Integration of Ferroelectric Thin Films into Nonvolatile Memories", *J. Vac. Sci. Technol. A*, vol. 10, pp. 1554~1560, 1992.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, third edition, John Wiley & Sons, New York, Chapter 1, 1998.
- [6] F. K. Chai, J. R. Brews, R. D. Schrimpf and D. P. Birnie III, "Relating Local Electric Field in a Ferroelectric Capacitor to Externally Measureable

- Voltages", *Proceedings of the 9th Int. Symp. on Applications of Ferroelectrics*, pp. 83~86, 1994.
- [7] J. A. Gonzalo, *Effective Field Approach to Phase Transitions and Some Applications to Ferroelectrics*, World Scientific Lecture Notes in Physics, vol. 25, World Scientific, New Jersey, 1991.
- [8] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, second edition, John Wiley & Sons, New York, Chapter 8, 1981.
- [9] R. R. Pierret, *Field Effect Devices*, second edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., USA, Chapter 2-3, 1990.
- [10] D. K. Schroder, *Advanced MOS Devices*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., USA, Chapter 1, 1987.
- [11] E. S. Yang, *Microelectronic Devices*, McGraw-Hill, Inc., USA, Chapter 9, 1988.
- [12] S. L. Miller and McWhorter, "Physics of the Ferroelectric Nonvolatile Memory Field Effect Transistor", *J. Appl. Phys.*, vol. 72 (12), pp. 5999~6010, 1992.
- [13] P. C. Joshi and S. B. Krupanidhi, "Switching, Fatigue, and Retention in Ferroelectric Bi₄Ti₃O₁₂ Thin Films", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 62, pp. 1928~1930, 1993.
- [14] 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.
- [15] Y. Fujimori, N. Izumi, T. Nakamura and A. Kamisawa, "Sr₂(Ta,Nb)₂O₇ Ferroelectric Thin Film for Ferroelectric Memory FET", *Integrated Ferroelectrics*, vol. 21, Num. 1-4, pp. 73~82, 1998.
- [16] M. H. Lim, T. S. Kalkur and Y. T. Kim, "Strontium Bismuth Tantalate Based Ferroelectric Gate Field Effect Transistor with Yttrium Oxide as the Buffer Layer", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 493, pp. 465-470, 1997.

저 자 소 개



李 國 杓(正會員)

1875년 11월 20일생. 1999년 2월, 인하대학교 전자재료공학과 졸업(B.S.). 1999년 3월~현재, 인하대학교 전자재료공학과 석사과정. 주관심분야 : 강유전체 박막을 이용한 NVFRAM 소자



姜 聲 俊(正會員)

1965년 7월 10일생. 1989년 2월, 인하대학교 응용물리학과 졸업(B.S.). 1994년 8월, 인하대학교 전자재료공학과 졸업(M.S.). 1999년 2월, 인하대학교 전자재료공학과 졸업(Ph. D.). 1999년 3월~2000. 1, 인하대학교 전자재료공학과 연구원(Post Doc.). 2000년 2월~현재, 국립여수대학교 반도체·응용물리학과 전임강사. 주관심분야 : DRAM 및 NVFRAM 응용을 위한 강유전체 박막, Pyroelectric 센서



尹 英 燮(正會員)

1952년 9월 7일생. 1975년 2월, 서울대학교 금속공학과 졸업(B. S.). 1977년 2월, 한국과학원 재료공학과 졸업(M.S.). 1988년 12월, 한국과학원 재료공학과 졸업(M.S.). 1988년 12월, U.S.C. 전자공학교 졸업(Ph. D.). 1987년 3월~1988년 5월, Oklahoma State Univrsity 대우교수. 1988년 12월~1992년 2월, 삼성전자 기흥반도체연구소 수석연구원. 1992년 3월~1996년 3월, 인하대학교 전자재료공학과 부교수. 1996년 4월~현재, 인하대학교 전자재료공학과 부교수. 주관심분야 : ULSI DRAM을 위한 신물질 개발, 강유전성 박막, Pyroelectric 센서, SAW Device