

# LiNbO<sub>3</sub> 강유전체 박막을 이용한 MFS 디바이스의 Retention 및 Fatigue 특성

## Retention and Fatigue Properties of MFS Devices using Ferroelectric LiNbO<sub>3</sub> Thin Films

정순원, 김채규, 김용성, 김진규, 이남열, 김광호\*, 유병곤\*\*, 이원재\*\*  
(Soon-Won Jung, Chae-Gyu Kim, Yong-Seong Kim, Jin-Kyu Kim, Nam-Yeal Lee, Kwang-Ho Kim\*, Byung-Gon Yu\*\*, Won-Jae Lee\*\*)

청주대학교 전자공학과  
청주대학교 전자·정보통신·반도체 공학부\*  
한국전자통신연구원\*\*

(Dept. of Electronic Eng. Cheongju University)

(School of Electronic·Computer & Communication·Semiconductor Eng. Cheongju University)\*

(Electronics and Telecommunications Research Institute)\*\*

### Abstract

The retention and fatigue properties of ferroelectric LiNbO<sub>3</sub> thin films were studied. Metal-ferroelectric-semiconductor(MFS) devices by using rapid thermal annealed LiNbO<sub>3</sub>/Si structures were successfully fabricated and demonstrated nonvolatile memory operations of the MFS devices. The I<sub>D</sub>-V<sub>G</sub> characteristics of MFSFET's showed a hysteresis loop due to the ferroelectric nature of the LiNbO<sub>3</sub> thin film. The ferroelectric capacitors showed practically no polarization degradation up to about 10<sup>10</sup> switching cycles when subjected to symmetric bipolar voltage pulse (peak-to-peak 6V, 50% duty cycle) in the 500kHz. The retention properties of the LiNbO<sub>3</sub> thin films were quite good up to about 10<sup>3</sup> s.

**Key Words(중요용어)** : Retention (보유 특성), Fatigue (피로 특성), FeRAM (강유전체 메모리), Nonvolatile memory (비휘발성 메모리), LiNbO<sub>3</sub> thin films (LiNbO<sub>3</sub> 박막), MFSFET, Ferroelectric oxide LiNbO<sub>3</sub> (산화물계 강유전체 LiNbO<sub>3</sub>)

### 1. 서론

최근 비휘발성 메모리에 이용하기 위한 강유전체 박막은 그들의 쌍안정(bi-stable) 특성 때문에 많은 주목을 받고 있으나 메모리의 상업적인 이용은 fatigue<sup>1)</sup>, retention<sup>2)</sup> 그리고 imprint<sup>3)</sup>와 같은 문제들 때문에 지연되고 있는 실정이며, 이러한 문제들을 해결하기 위한 연구와 새로운 물질을 개발하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 강유전체 박막의 분극반전과 그 히스테리시스 특성을 이용한 비휘발성 강유전체 메모리(non-volatile FeRAM)<sup>4)</sup>는

고집적도, 고속구동, 고내구성, 저소비전력화를 실현할 수 있는 이상적인 메모리로서 기대가 급격히 높아져 세계 각국에서 연구개발이 활발하게 이루어지고 있다. FeRAM<sup>5)~6)</sup>은 그 동작 원리에 따라 크게 반전분극 전류형태(capacitor type)와 FET(Field-Effect Transistor type)형태 두 가지로 나눌 수 있다. 반전분극 전류형태는 현재 상품화되어 있는 반면 FET형태는 이론적·실험적으로는 그 동작 원리가 확인되어 있으나 제조상의 기술적 어려움 때문에 아직 상용화는 되지 못하고 있다. 반전분극 전류형이란 기존의 DRAM과 거의 똑같은 소자 구조

를 가지면서 커패시터 물질을 상유전체(paraelectric)에서 강유전체(ferroelectric)로 대체한 것이다. 커패시터형의 FeRAM은 정보가 "1"인 경우 정보를 읽은 후에 다시 데이터를 refresh시켜 주어야 하는 DRO(Destructive Read Out)형이기 때문에, 공정의 복잡성·cell size의 증가 등을 초래하게 된다. 이런 문제점을 해결하고 나아가 cell 한 개로써 이러한 기능을 가능하게 할 수 있는 구조가 FET형태이다. FET형 FeRAM은 기존의 MOSFET에서 gate oxide를 SiO<sub>2</sub> 대신에 ferroelectric으로 대체한 것이다. ferroelectric gate oxide의 분극 방향에 따라서 source, drain 사이에 conductance의 차이가 생겨 이 차이로부터 정보가 "0" 혹은 "1" 이었는지를 판단해 내는 것이다. 이와 같은 FET형태는 커패시터 형태와는 달리 정보를 읽어낼 때 정보가 파괴되지 않는 NDRO(Non-destructive Read Out)형이다. 즉, 분극반전이 발생하지 않기 때문에 분극반전의 반복에 따른 강유전체 박막의 피로현상을 염려하지 않아도 되는 고내구성의 소자를 실현할 수 있으며, 별도의 커패시터를 필요로 하지 않기 때문에 소자의 구조가 간단하며 집적도를 높이는데 유리한 장점이 있다.

본 논문에서는 산화물계 강유전체인 LiNbO<sub>3</sub>를 절연막으로 이용한 MFS 디바이스를 성공적으로 구현했으며 비휘발성 메모리로서의 응용 가능성을 확인하고자 Fatigue와 Retention 특성 등에 대한 실험을 하였던 바, 그 결과를 논의하고자 한다.

## 2. 실험 및 결과

### 2.1 MFS 디바이스의 제작

그림 1은 산화물계 강유전체 LiNbO<sub>3</sub>를 이용한 MFS 디바이스의 제작 순서도를 나타낸 것이다. 디바이스 제작에 관련된 내용은 보고된 논문<sup>8)</sup>에 상세히 기술되어 있으며, 참고로 본 실험에 사용된 시료에 대해서만 기술하면, 칩 전체의 크기는 10 mm×10 mm이다. 이 시료는 12개의 MFSFET와 계면 특성 측정용 MFS-Capacitor 12개로 구성되어 있다. FET에 있어서 게이트의 길이 L과 게이트 폭 W는 각각 50μm, 500μm이다. 이렇게 만들어진 디바이스의 특성 평가에는 Precision Semiconductor Parameter Analyzer(HP4156A)와 RT-66A Standardized Ferroelectric Test System을 사용하였다.

### 2.2 MFS 디바이스의 특성

그림 2는 n<sup>+</sup> 위에 형성시킨 MFS 커패시터의 분극-전계에 대한 히스테리시스 특성을 RT-66A 강유전체 측정 시스템을 이용하여 측정된 것이다. 박막의 전극 의존성도 동시에 확인할 수 있도록 하기 위하여 Al 전극과 Pt 전극을 형성시킨 후 측정하였는데, 전극에 의한 영향은 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

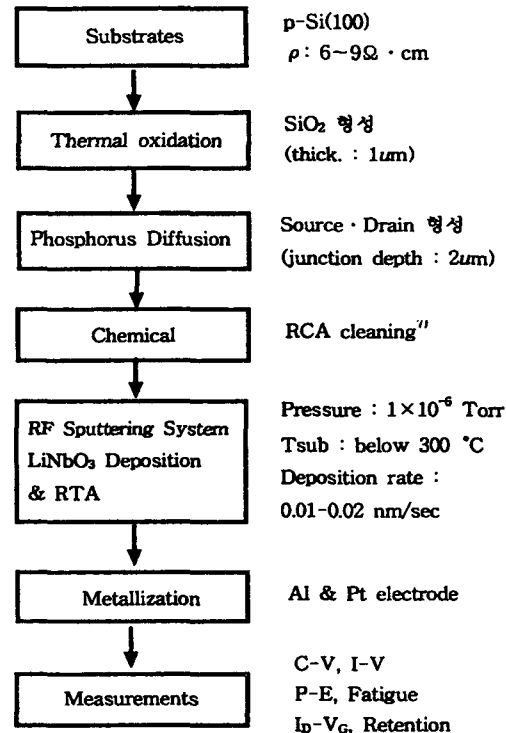


그림 1. 산화물계 강유전체인 LiNbO<sub>3</sub>를 이용한 MFS 디바이스의 제작 순서도.  
Fig. 1. MFS devices fabrication flow chart using ferroelectric oxide LiNbO<sub>3</sub>.

그림 3은 스위칭 주기에 따른 잔류 분극의 변화를 나타낸 것이다. 강유전체 capacitor의 분극반전을 반복하면, 즉 FeRAM에서 data의 읽기/쓰기를 반복하다 보면 P-E 곡선의 모양이 변형되고, +P<sub>r</sub>, -P<sub>r</sub> 값이 점점 작아져 최후에는 그 값이 0이 되어 강유전성을 소멸하게 되어 비휘발성 메모리로서의 역할을 하지 못하게 되는 현상이 발생하는데, 이를 피로 현상(fatigue)이라고 한다. 본 실험에 사용된 측정방법은 일반적인 RT-66A 강유전체 측정 시스템만을 이용한 측정이 아니라 MFS 구조라는 것을 감안하여 측정된 것이다. Pulse Generator(HP8110A)를 가지고 필요로 하는 임의의 바이폴라 펄스를 만들어 external mode로 측정하였다. 제작한 커패시터의 전극 면적은 3.14×10<sup>-4</sup>cm<sup>2</sup>이고, 막의 두께는 95nm이다. external pulse의 period, width, frequency는 각각 2μs, 1μs, 500kHz이다. 그림에서 보면 10<sup>10</sup> cycle 까지 나타난 잔류분극 값이 초기값과 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 대단히 우수한 피로 특성이라고 할 수 있다. 또한 전극의 변화에 대한 피로 특성을 알아보기 위해 Pt 전극을 사용하여 측정된 결과도

Al 전극과 마찬가지로 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

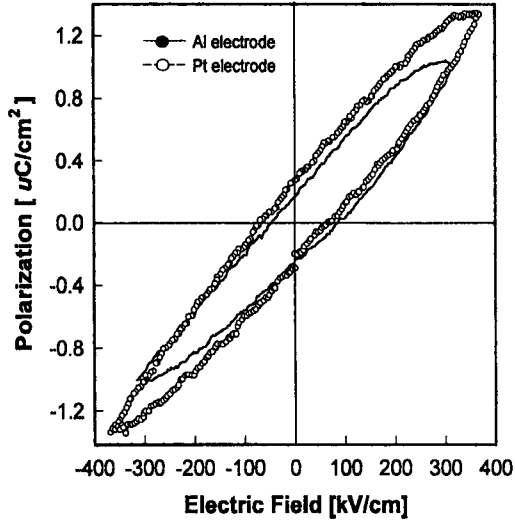


그림 2. RT-66A 강유전체 측정 시스템을 이용하여 측정된 Si(100)위에 형성시킨 MFS 커패시터의 분극-전계에 대한 히스테리시스 곡선.  
Fig. 2. P-E hysteresis loop of a MFS capacitor fabricated on Si(100) substrate using a RT-66A standardized ferroelectric test system.

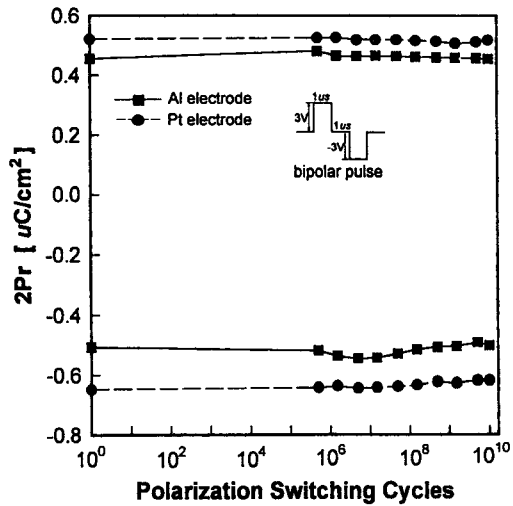


그림 3. 스위칭 주기에 따른 잔류 분극.  
Fig. 3. The remanent polarization ( $P_r$ ,  $-P_r$ ) of the films as a function of number of switching cycles.

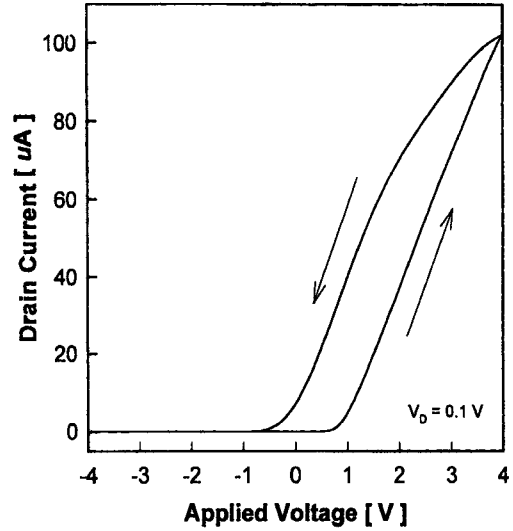


그림 4. 선형영역에서의 n-채널 MFSFET의 드레인 전류-게이트 전압특성.  
Fig. 4.  $I_D$ - $V_G$  characteristics of n-channel  $\text{LiNbO}_3/\text{Si}(100)$  MFSFET for linear region.

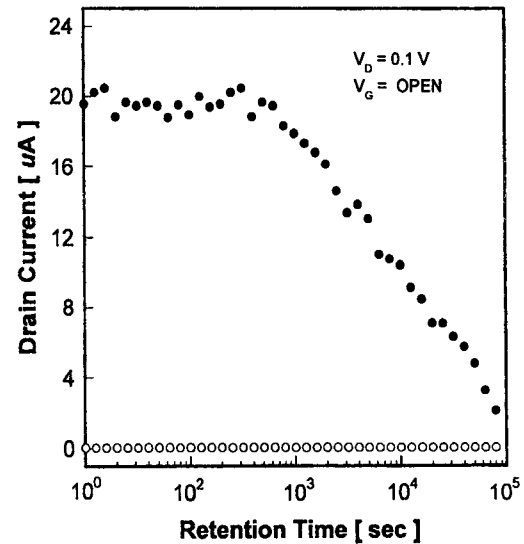


그림 5. MFSFET에 대한 드레인 전류의 시간 의존성.  
Fig. 5. Time dependence of drain current of the MFSFET.

그림 4는 MFSFET의 선형영역( $V_D=0.1V$ )에서의 드레인 전류-게이트 전압 ( $I_D$ - $V_G$ ) 특성을 보인 것

이다.  $\text{LiNbO}_3$  박막의 강유전성으로 인하여 히스테리시스 특성이 관측됨을 알 수 있으며, 이는 비휘발성 메모리 동작에 적용할 수 있는 가능성을 보인 것이다. 그래프로부터 산출한 전자의 전계효과 이동도는 약  $250 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  이며, 상호 컨덕턴스는 약  $80 \mu\text{S}/\text{mm}$  이다.

그림 5는 드레인 전류의 시간 의존성, 즉 retention 측정 결과를 보인 것이다. 펄스를 1초 동안 인가한 후 시간이 경과함에 따라 드레인 전류의 변화를 알아보기 위한 측정이다. 그림 4의 드레인 전류-게이트 전압( $I_D-V_G$ ) 특성곡선으로부터 게이트 전압이 드레인 전압과 같은  $V_D=V_G=0.1\text{V}$  에서 ON상태와 OFF상태의 두점을 잡아서 측정했다. 먼저 ON 상태는 드레인 전압( $V_D=0.1\text{V}$ )을 기준으로 +4V의 펄스를 1초 동안 가한 후 게이트 전극을 floating 시킨 상태에서 드레인 전압( $V_D=0.1\text{V}$ ) 만을 인가한 후 측정된 것이고, OFF 상태는 드레인 전압( $V_D=0.1\text{V}$ )을 기준으로 -4V의 펄스를 1초 동안 가한 후 게이트 전극을 floating 시킨 상태에서 드레인 전압( $V_D=0.1\text{V}$ )만을 인가한 후 측정된 것이다. 결과적으로 OFF 상태에서는 드레인 전류의 변화가 거의 없었으며, ON 상태에서는 약  $10^3$  초까지는 드레인 전류의 변화가 거의 없으나 그 이후부터는 지수 함수적으로 감소함을 알 수 있다. 정확한 원인은 현재 연구 중에 있으며 아직 최적화가 되지 않은 상태에서 이 정도의 retention 결과가 얻어진 것은 앞으로 특성 개선의 가능성이 있는 것으로 판단된다.

### 3. 결론

강유전성이 유지되면서 양호한 계면 특성을 얻기 위하여 기판 온도  $300^\circ\text{C}$  이하의 저온에서  $\text{LiNbO}_3$  박막을 실리콘 위에 직접적으로 sputtering법을 이용하여 형성하고, 고온 순간 열처리를 수행하였다. 이렇게 제작된 MFS 커패시터의 분극-전계에 대한 히스테리시스 곡선으로부터 약  $0.5 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  정도의 잔류분극이 있음을 확인할 수 있었고, 이 잔류분극 값을 가지고 fatigue 특성을 측정한 결과  $10^{10}$  cycle 까지 측정된 잔류분극 값이 초기 값과 거의 같음을 알 수 있었다. 또한 전극의존성을 알아보기 위해 Al 전극과 Pt 전극을 형성시킨 후 측정하였는데, 전극에 의한 차이는 크지 않음을 확인할 수 있었다. FET의  $I_D-V_G$  특성에서  $\text{LiNbO}_3$  박막의 강유전성으로 인하여 생긴 히스테리시스 특성을 관측할 수 있었으며, 그래프의 선형 영역으로부터 산출한 전자의 전계효과 이동도와 상호 컨덕턴스는 각각  $250 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ,  $80 \mu\text{S}/\text{mm}$  이었다. 즉,  $\text{LiNbO}_3/\text{Si}$  구조를 사용한 MFSFET의 비휘발성 메모리 동작과 적용 가능성이 확인되었다. 드레인 전류의 시간 의존성, 즉 retention 측정 결과를 알아보기 위하여 펄스를 1초 동안 인가한 후 시간이 경과함에 따라 드레인 전류의 변화를 알아보았다. OFF 상태에서의 드레인 전류는 변화가 거의 없었으나, ON 상태에서는 약  $10^3$

초까지는 드레인 전류의 변화가 거의 없으나 그 이후부터는 지수 함수적으로 감소함을 알 수 있었다. 아직 최적화가 되지 않은 상태에서 이 정도의 retention 결과가 얻어진 것은 앞으로 특성 개선의 가능성이 있는 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. T. Mihara, H. Watanabe and C. A. Araujo, "Characteristic Change Due to Polarization Fatigue of Sol-Gel Ferroelectric  $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.4}\text{Ti}_{0.6})\text{O}_3$  Thin-Film Capacitors", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 33, Part 1, No. 9B, pp. 5281-5286, September, 1994.
2. Y. Shimada, M. Azuma, K. Nakao, S. Chaya, N. Moriwaki, and T. Otsuki, "Retention Characteristics of a Ferroelectric Memory Based on  $\text{SrBi}_2(\text{Ta}, \text{Nb})_2\text{O}_9$ ", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 36, Part 1, No. 9B, pp. 5912-5916, September, 1997.
3. T. Mihara, H. Watanabe and C. A. Araujo, "Evaluation of Imprint Properties in Sol-Gel Ferroelectric  $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$  Thin-Film Capacitors", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 32, Part 1, No. 9B, pp. 4168-4174, September, 1993.
4. Y. Masuda, H. Masumoto, A. Baba, T. Goto and T. Hirai, "Preparation of  $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$  Film by RF Magnetron Sputtering Method", Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 32, Part 1, No. 9B, pp. 4043-4047, September, 1993.
5. S.-Y. Wu, "A New Ferroelectric Memory Devices, Metal - Ferroelectric - semiconductor Transistor", IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-21, No. 8, pp. 499-504, Aug. 1974.
6. H. Buhay, S. Sinharoy, W. H. Kasner, M. H. Fra ncombe, D. R. Lampe, and E. Stepke, "Pulsed Laser Deposition and Ferroelectric Characterization of Bismuth Titanate Films", Appl. Phys. Lett., Vol. 58, pp. 1470-1472, 1991.
7. K. Werner, and D. A. Puotinen, "Cleaning Solutions Based on Hydrogen Peroxide for use in Silicon Semiconductor Technology", RCA Review. 31., pp. 187-206, June. 1970.
8. K. H. Kim, C. G. Kim, S. W. Jung, S. W. Lee, J. S. Lyu, B. G. Yu and W. J. Lee, "Metal - Ferroelectric - Semiconductor(MFS) FET's Using  $\text{LiNbO}_3/\text{Si}(100)$  Structures For Nonvolatile Memory Application", 1998 Int. workshop on Advanced LSIs, Sapporo, Japan, July 23-24, 1998, Proceedings, pp. 193-197