

# PLT(5) 박막의 Switching 및 Retention 특성에 관한 연구

## A Study on the Switching and Retention Characteristics of PLT(5) Thin Films

최준영, 장동훈, \*강성준, 윤영섭

인하대학교 전자·전기공학부, \*여수대학교 반도체학과  
전화 : 032-873-1345 / 핸드폰 : 016-249-9947

Joon Young Choi, Dong Hoon Chang, Seong Jun Kang, Yung Sup Yoon  
Dept. of Electric & Electrical Engineering, Inha University  
Dept. of Semiconductor Materials & Devices, Yosu National University  
E-mail : brainpowerbr@hotmail.com

### 요 약

We fabricated PLT(5) thin film on Pt/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si substrate by using sol-gel method and investigated leakage current, switching and retention properties. The leakage current density of PLT(5) thin film was  $3.56 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$  at 4V. In the examination of switching properties, pulse voltage and load resistance were 2V~5V and  $50 \Omega \sim 3.3 \text{ k}\Omega$ , respectively. Switching time had a tendency to decrease from 520ns to 140ns with the increase of pulse voltage, and also the time was increased from 140ns to 13.7 $\mu$ s with the increase of load resistance. The activation energy obtained from the relation of applied pulse voltage and switching time was about 143kV/cm. The error of switched charge density between hysteresis loop and experiment of polarization switching was about 10%. Also, polarization in retention was decreased as much as about 8% after 10<sup>5</sup>s.

### 1. 서론

강유전체 박막 중 PLT 박막은 La 농도를 조절함에 따라 다양한 전기적 특성을 나타내어 DRAM 뿐만 아니라 비휘발성 메모리에 이르기까지 매우 폭 넓게 사

용될 수 있는 장점을 가진 재료로 평가되고 있다.[1,2] 강유전체 박막의 여러 가지 전기적 특성 중에서 펄스 인가에 의한 분극 스위칭과 시간에 따른 분극 감소를 나타내는 retention 특성은 각각 메모리 소자의 동작속도와 신뢰성을 결정짓는 중요한 특성들이지만, 그에 대한 연구는 많이 이루어지지 않고 있다. 특히, PLT(5) 박막의 경우 아직까지 이러한 영향이 고려된 스위칭 특성 및 소자의 신뢰성과 관련된 retention 특성에 대한 연구가 거의 없었다.

따라서 본 논문에서는 La 가 5mol% 첨가된 PLT(5) 박막을 Pt/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si 기판 위에 sol-gel 법으로 제작한 후 PLT(5) 박막의 스위칭과 retention 특성에 대해 연구하였다. 스위칭 특성은 외부인가 펄스 전압 및 부하저항에 대한 영향을 고려하여 실시하였고, retention 특성은 10<sup>5</sup>s 까지의 시간에 대해 측정하였다.

### 2. 실험방법

본 연구에서는 sol-gel 방법을 이용하여 PLT 박막을 제작하였다. 출발 물질은 Pb(C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>2</sub>)<sub>2</sub> · 3H<sub>2</sub>O, La(OOCCH<sub>3</sub>)<sub>3</sub> · 1.5H<sub>2</sub>O, Ti(OCH(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)<sub>4</sub> 를 사용하였다. Acetic acid 를 metal alkoxide 의 stabilizer 로 사용하였고, 점도의 조절과 기판에 대한 wettability 의 향상을 위해 n-propanol 을 이용하였다. PLT(5) 박막을 coating 후 110℃ 와 400℃ 에서 각각 10분, 15분 간 건조시키고 다시 coating 하는 방법을 사용하였다.

그 후 furnace 를 이용해 650°C에서 30분간 열처리하여 박막의 제작을 완료하였다. PLT(5) 박막 위에 전극물질로 Ag 를 증착하여 캐패시터 형태를 구성하고 전기적 특성을 측정하였다. RT66A standardized ferroelectric test system (Radiant 사) 를 이용하여 PLT 박막의 hysteresis 와 retention 특성을 측정하였고, 분극 스위칭 특성은 pulse generator (HP8110A) 와 오실로스코프 (HP54522A) 를 이용하여 측정하였다.

### 3. 결과 및 논의

누설전류 특성은 강유전체 박막을 메모리 소자로 활용하기 위해 고려해야할 중요한 요소 중의 하나이다. 누설전류가 증가하면 소비전력이 늘어나며 소자에 인가되는 전기장이 제한되는 등의 문제가 발생하기 때문이다. 그림 1 에 PLT(5) 박막의 누설 전류 밀도를 나타내었다. 누설전류밀도가 급격히 증가하여 절연과괴 현상이 일어나는 breakdown 현상은 나타나지 않았으며, 4V 에서도  $3.56 \times 10^{-7} \text{A/cm}^2$  의 비교적 낮은 누설전류밀도 값을 나타내었다.

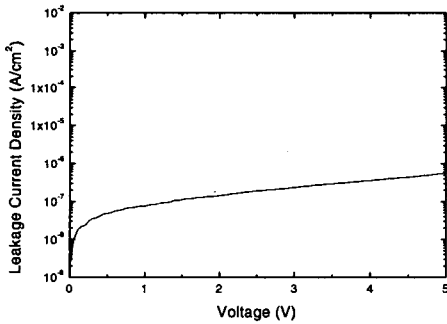


그림 1. PLT(5) 박막의 누설 전류특성

그림 2 는 상부전극의 면적이  $3.14 \times 10^{-4} \text{cm}^2$  이고, La 농도가 5mol% 인 PLT 박막의 이력곡선을 인가되는 전압의 함수로 나타낸 것이다. 그림을 보면 인가되는 전압이 증가할수록 이력곡선의 모양이 점차 포화되는 강유전체의 전형적인 특징을 나타내고 있으며, PLT(5) 박막이 강유전체임을 확인할 수 있었다. 인가 전압 5V 에서 잔류분극의 두 배값 (2P<sub>r</sub>) 과 항전계(E<sub>c</sub>) 는 각각  $7.45 \mu\text{C/cm}^2$  과  $38.6 \text{kV/cm}$  로 측정되었다.

Retention 특성은 -5V 의 write 사각펄스를 인가하고 최종적으로 +5V 와 -5V 두 개의 read 사각 펄스를 인가하여 그 특성을 조사하였다. Write 펄스 폭과 read 펄스 폭은 각각 8.6μs 와 2ms 로 지정하였으며,

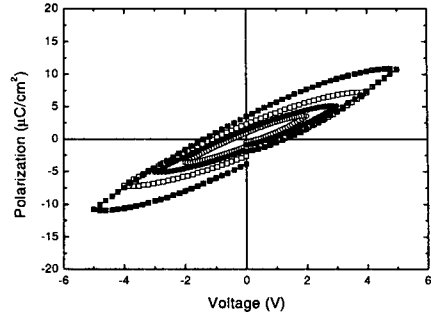


그림 2. 다양한 인가 전압에 따른 PLT(5) 박막의 hysteresis

write 와 read 펄스 사이의 시간 지연을 retention 시간으로 정하였다. Retention 발생의 주요 원인은 표면 공간전하와 ferroelastic 에 의한 탈분극(depolarization) 전계로 보고되고 있으며[3], 10<sup>5</sup>s 이후에 10% 이하의 분극감소를 나타낼 경우 믿을 만한 신뢰성을 보이는 것으로 알려져 있다.[4] 분극 감소 특성을 나타낸 그림 3 을 보면 10<sup>5</sup> 시간 이후에도 분극 감소율이 8% 정도로 비교적 우수하게 나타났다.

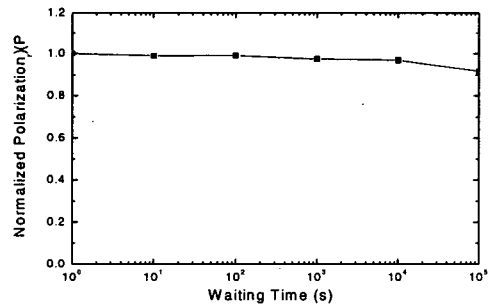


그림 3. PLT(5) 박막의 retention 특성

강유전체 박막의 영구 전기쌍극자 반전과 연관된 동적 프로세스인 스위칭 특성은 이를 이용하여, switched charge density (Q<sub>sw</sub>) 와 스위칭 시간 (t<sub>s</sub>) 에 대한 정보를 얻을 수 있다. 강유전체 박막의 스위칭 특성은 RC 직렬회로가 사용되며, 일련의 펄스들로 구성된 입력신호가 사용된다. 펄스 스위칭에 대한 응답신호는 PLT(5) 캐패시터에 직렬로 연결된 부하저항의 양단에서 transient voltage 로 측정된다. 입력 전압에 대한 응답 특성과 부하저항을 측정 변수로서 고려하였으며, 측정 조건을 표 1 에 나타내었다.

그림 4 는 상부전극의 면적이  $3.14 \times 10^{-4} \text{cm}^2$  인 PLT(5) 박막에 double bipolar 펄스를 인가하여 발생

표 2. 스위칭 특성의 측정 조건

Top electrode area ( $A_e$ )	$3.14 \times 10^{-4} \text{cm}^2$
Pulse voltage ( $V_D$ )	2V ~ 5V
Pulse width ( $W_D$ )	1500ns
Pulse rise time ( $t_r$ )	2ns
Sense resistance (R)	$50\Omega \sim 3.3k\Omega$

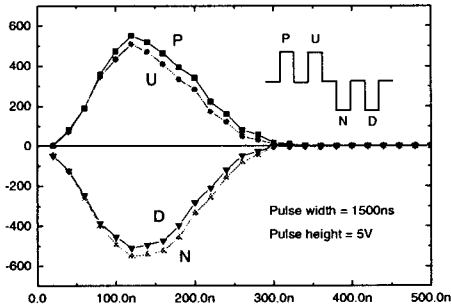


그림 4. PLT(5) 박막의 펄스 스위칭에 대한 응답특성

한 positive 와 negative 스위칭 응답특성을 나타낸 것이다. 이때, 입력펄스의 폭은 1.5 $\mu$ s 이고, 펄스 전압의 크기는 5V 이다. PLT(5) 박막의 스위칭 transient 는 초기의 setup 펄스에 의해 음으로 분극된 박막에 그림에 나타난 입력펄스들에서 첫 번째 (+) 펄스전압(P)을 인가하여 발생시키고, non-switching transient 는 두 번째 (+) 펄스전압(U)을 인가하여 발생시킨다. 또 그림 4 에서 (-) 영역은 그 반대의 펄스 전압 (N과 D)을 인가하여 발생시킨다. PLT(5) 박막의 본질적인 스위칭 특성을 측정하기 위해서 switching transient 곡선에서 non-switching transient 곡선을 뺀 relative switching transient 곡선을 이용하였다.

그림 5 는 입력 펄스의 폭이 1.5 $\mu$ s 인 2V 에서 5V 까지 입력 펄스전압에 대한 relative current response 를 나타낸 것이다. 그림을 보면 인가 전압의 크기에 따라 peak current 가 감소하는 것을 볼 수 있으며, 스위칭 시간은 입력 펄스전압이 2V에서 5V까지 증가함에 따라 520ns 에서부터 140ns로 감소하였다. 일반적으로 스위칭 시간은 relative current 가 최대 값으로부터 10% 까지 감소한 부분까지 걸린 시간으로 정의되며[5], switched charge density 는 relative current response 곡선의 면적을 구함으로써 얻을 수 있다.[6] 표 2 에 이력 곡선으로부터 구한 switched charge density 와 분극 스위칭으로부터 구한 switched charge density 를 나타내었다. 분극 스위칭 실험에 의한 switched charge density 는 이력곡선에서 잔류 분극의 2배 값에 상응되는 값을 나타내게 된다. 5V에

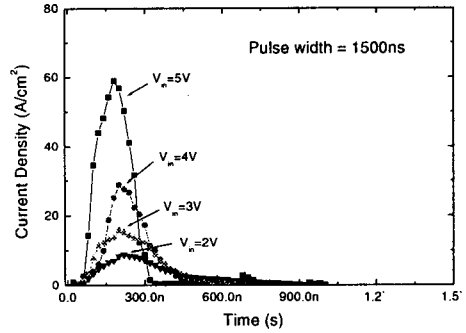


그림 5. 2 에서 5V 까지 입력 펄스전압에 따른 PLT(5) 박막의 relative current response

서 이력곡선과 분극 스위칭 실험에 의한 switched charge density 는 이력곡선에서 잔류분극의 2배 값에 상응되는 값을 나타내게 된다. 5V에서 이력곡선과 분극 스위칭 실험으로부터 구한 switched charge density 는 각각  $7.45\mu\text{C}/\text{cm}^2$  과  $8.49\mu\text{C}/\text{cm}^2$  으로 약 10% 정도의 오차를 보이며 비교적 잘 일치하였다.

표 2. 이력 곡선과 분극 스위칭으로부터 구한 switched charge density

Voltage (V)	Switched Charge Density( $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ )	
	P-V plot	J-t plot
2	2.1	2.36
3	3.17	3.53
4	4.97	5.1
5	7.5	8.49

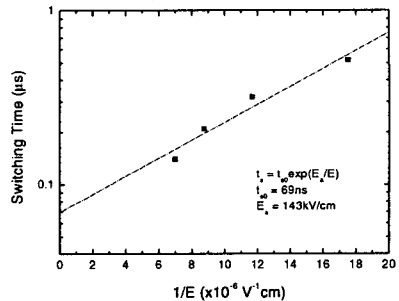


그림 6. PLT(5) 박막의 인가 펄스전계에 대한 스위칭 시간의 의존성

그림 6 은 인가된 펄스전계에 대한 스위칭 시간의 의존성을 나타낸 것이다. 스위칭 시간이 식(1)에 나타난 것과 같은 exponential law[7] 를 만족한다고 가정하여 측정된 스위칭 시간과 인가 펄스전압의 관계를

fitting 하여 구한  $t_{s0}$ 와  $E_a$  는 각각 69ns 와 143kV/cm 이었다.

$$t_s = t_{s0} \exp\left(\frac{E_a}{E}\right) \quad (1)$$

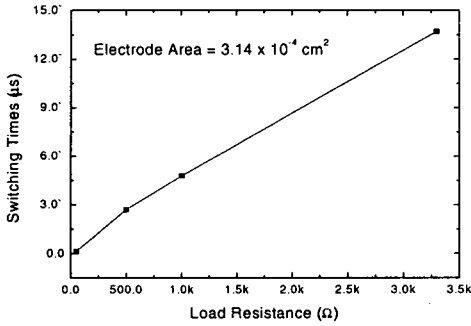


그림 7. 부하저항에 대한 스위칭 시간의 의존성

그림 7 은 부하저항에 대한 스위칭 시간의 의존성을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 부하저항을 50Ω 에서 3.3kΩ 으로 증가시킴에 따라, 스위칭 시간은 140ns 에서 13.7μs 까지 증가하였다. 이러한 저항 대 전류 응답과의 관계는 식(2) 로부터 추론될 수 있다.[8]

$$i = i_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2)$$

여기서,  $\tau=RC$  로 전기적 시상수이다.

이러한 결과로부터 스위칭 특성 측정 회로의 저항 성분에도 의해서도 스위칭 특성이 영향을 받을 수 있음을 알 수 있으며, 측정회로의 저항 성분을 줄임으로서 측정 정확도를 향상시킬 수 있고, 실제 소자의 응용에 있어서도 회로간의 저항성분을 줄여 동작 속도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 Pt/TiO<sub>x</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si 기판 위에 sol-gel 법으로 PLT(5) 박막을 제작한 후 소자의 동작속도를 결정짓는 스위칭 특성 및 시간에 따른 분극 감소로 소자의 신뢰성을 결정짓는 retention 특성에 대해 연구하였다. PLT(5) 박막은 4V에서 3.56×10<sup>-7</sup>A/cm<sup>2</sup> 의 비교적 낮은 누설전류밀도 값을 나타내었으며, 이력곡선을 측정한 결과 5V 에서 잔류분극의 2배 값 (2Pr) 과 항전계 ( $E_c$ ) 는 각각 7.5μC/cm<sup>2</sup> 과 38.6kV/cm 로 측정되었다. PLT(5) 박막의 스위칭 특성을 측정 한 결과,

외부인가 전압이 2V 에서 5V 까지 증가함에 따라, 520ns 에서부터 140ns 로 감소하였다. 또한 인가된 펄스 전압에 대한 스위칭 시간과의 관계로부터 구한 활성화 에너지 ( $E_a$ ) 는 143kV/cm 이었다. PLT(5) 박막의 이력곡선과 분극 스위칭 실험으로부터 구한 switched charge density 는 2V 에서 5V 에 걸쳐 양쪽 값 사이의 오차는 약 10% 정도로 비교적 잘 일치하였다. -5V 의 write 사각펄스를 인가하고, 최종적으로 +5V 와 -5V 두 개의 read 사각 펄스를 인가하여 retention 특성을 조사하였다. Write 와 read 펄스 폭을 각각 8.6μs 와 2ms 로 지정하여, write 와 read 펄스 사이의 시간지연을 retention time 으로 정하여 측정한 PLT(5) 박막의 분극 감소는 10<sup>5</sup>s 이후에 약 8% 정도로 신뢰할 만한 값을 나타내었다. 본 실험을 통해 PLT(5) 박막이 우수한 스위칭 및 retention 특성을 가지고 있어 메모리 소자에 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

#### Reference

- [1] S. K Dey and J. J. Lee, IEEE Trans. Electron Devices, vol.39, no.7, pp. 1607~1612, 1992.
- [2] S. J. Kang and Y. S. Yoon, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 36, no. 7, pp. 4459~4465, 1997.
- [3] J. J. Lee and S. B. Desu, Phys. state. sol. vol. (a)151, pp. 171~182, 1995.
- [4] Deborah J. Taylor, Ferroelectric Film Devices, Academic Press, pp. 28~30, 2000.
- [5] A. K. Kulkarni, IRPS Tutorials, pp. 8.1~8.52, 1990.
- [6] Y. S. Yoon et al. Proceedings of 2000 IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, pp. 941~944, 2000.
- [7] M. E. Lines and A. M. Glass, Principles and Applications of Ferroelectrics and Related Materials, Oxford Univ. Press, Oxford, pp. 106, 1977.
- [8] P. C. Joshi and S. B. Krupanidhi, Appl. Phys. Lett., vol. 62, no. 16, pp. 1928~1930, 1993.