

# 강유전체박막 Capacitor의 강유전 특성 평가

조금석 · 임지은 · 권오성 · 황철성<sup>a)</sup> / 김승현 · 이동수  
 a)서울대학교 공과대학 재료공학부 / Inostek (주)  
 a) cheolsh@plaza.snu.ac.kr

## 1. 서론

강유전체란 단일 극축(polar axis)을 갖는 극축(polar class) 결정 중에서 잔류 분극(remanent polarization,  $P_r$ )을 가지고 절연과괴전계(breakdown field) 이하에서 항전계(coercive field,  $E_c$ )를 갖는 결정을 말한다.<sup>1,2)</sup> 강유전체의 분극은 격자의 변위로부터 기인한다. 강유전체의 분극은 전계가 제거된 상태에서 열역학적으로 안정한 +와 -의 두 상태( $\pm P_r$ )를 가지며 이는  $E_c$ 에서 반전될 수 있다. 이러한 강유전체의 특성은 Fig. 1(a)와 같은 이력 곡선(hysteresis loop)의 형태로 표현되며 평가되어진다. 이는 강유전체의 주요 응용 분야 중 하나인 메모리 소자의 두 가지 논리 상태 0과 1이 강유전체의  $\pm P_r$ 에 의해 표현될 수 있고 이 경우 소자의 신호 margin이 두 분극 상태의 차이 즉  $2P_r$ 이 되기 때문이다. 또한 이력 곡선을 측정함으로써 강유전체의 전계에 따른 반응 양상 및 여러 열화 기구(fatigue, imprint, retention) 등의

열화 현상을 평가할 수 있다. 본 논문에서는 이와 같은 강유전 이력 곡선 측정의 원리와 측정 결과에 미치는 여러 인자들의 영향을 논의하려 한다.

## 2. 이력곡선의 측정 방법

분극이란 결정내의 단위 부피 당 쌍극자(dipole moment)를 중화시키기 위해 구속된 표면 전하 밀도이다. 이와 같은 표면 전하를 측정하는 데에 P-V 이력곡선이 사용된다. 이력 곡선을 전기적으로 측정하는 가장 기본적인 방법에는 capacitor sensing(Sawyer-Tower mode)와 resistor sensing(Virtual ground mode)의 두 가지가 있다. Capacitor sensing은 Fig. 2(a)에 표현된 것처럼 원하는 강유전 capacitor를 정전용량 값( $C_{ref}$ )을 알고 있는 기준 capacitor에 직렬로 연결하고 전계를 가했을 때 기준 capacitor의 전위( $V_{sense}$ )를 측정하여  $Q_{sense} = C_{ref} V_{sense}$ 의 관계식을 이용하여 전하량을 측정함으로써 강유전

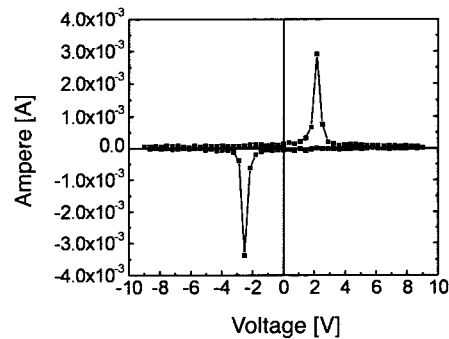
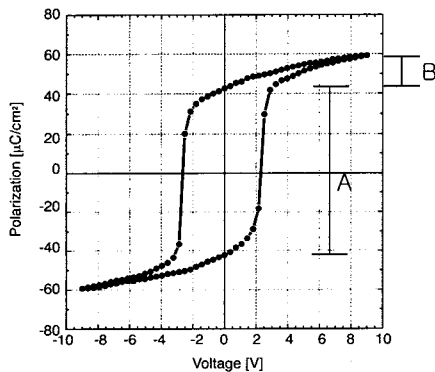
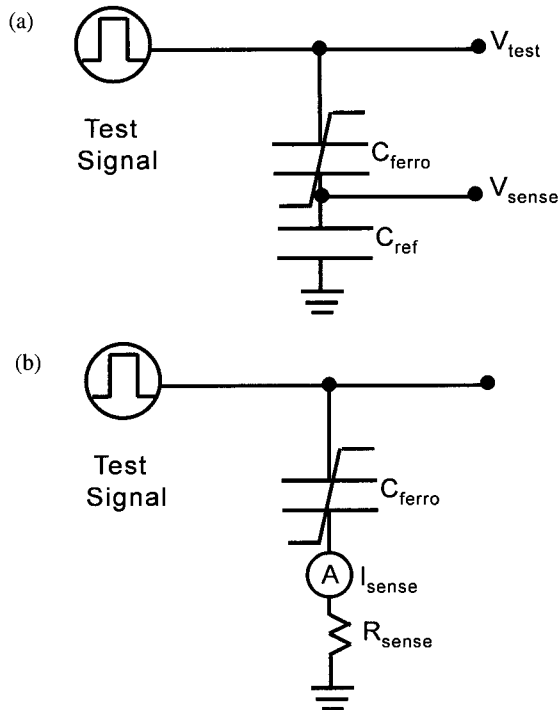


Fig. 1. (a) P-V hysteresis loop and (b) I-V hysteresis loop.



**Fig. 2.** P-V measurement circuits with (a) capacitor sensing mode, and (b) resistor sensing mode.

capacitor 시료의 P-V 이력곡선을 측정할 수 있다. 여기에서는 두개의 직렬 capacitor에 저장된 전하량은 같다는 점과 기준 capacitor의  $C_{ref}$ 는 V의 함수가 아님을 이용한다.

Resistor sensing 방법에서는 Fig. 2(b)처럼 기준 capacitor 대신에 표준 저항을 연결한다. 강유전 capacitor에 외부 전계를 가하면 분극이 발생하고 이 분극에 반응하여 전극에 전하가 저장된다. 이때에 전하는 이 표준 저항을 통과하게 되는데 이때 발생하는 시간당 전하의 이동, 즉 분극 전류를 측정하고 이를 시간에 대하여 적분하면 P-V 이력곡선을 얻을 수 있다. Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)의 이력 곡선에 해당하는 분극 전류가 가해진 전위에 따라 변화하는 모습을 나타낸 그림이다.

이상의 두 가지 방법에 의한 P-V 곡선은 시료의 절연성이 충분히 좋을 때 거의 차이가 없는 결과를 보인다.

이력 곡선을 측정하기 위하여 외부에서 가하는 전위는 일반적으로 정현파(sine wave)를 많이 사용하나 필요할 경우에는 삼각파 또는 사각형의 pulse 파를 사용하

기도 한다. 이에 관하여서는 뒤에 다시 언급한다.

한편 일반적인 유전체의 정전용량 C는 전위 V가 가해졌을 때 전극에 저장되는 전하량 Q와  $Q = \int_0^V C dV$ 의 관계를 가지므로 C-V 곡선을 얻어 이를 전위에 대해 적분하면 Q-V(또는 P-V) 곡선을 얻거나 Q-V(또는 P-V) 곡선을 얻어 전위에 대해 미분을 하여 C-V 곡선을 얻을 수 있을 것으로 생각되지만 이는 사실과 다르다. 강유전체에 전계를 가하면 전극에 저장되는 단위 면적당 전하량( $D = Q/A$ , A는 전극의 면적)은

$$D = P + \int_0^V C dV, \quad C = \epsilon_0 \epsilon_r(V) \left( \frac{1}{d} \right) \quad (1)$$

가 되고 대개의 강유전체의 경우 P는  $\int_0^V C dV$  항보다 훨씬 크기 때문에  $D \approx P$ 가 된다. 여기서  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_r$ , 그리고 d는 각각 진공의 permittivity, 유전체의 유전상수, 그리고 박막의 두께이다. 그런데 예를 들어 virtual ground mode에서 측정되는 D(P)는 위 식(1)의 D(P)를 의미하며 이는 주어진 전계에 반응하여 임의의 배열을 하고 있는 강유전 분역(domain)들이 가지는 표면 전하량의 합계에 해당한다. 식 (1)의 두 번째  $\int_0^V C dV$  항은 각 분역들이 갖는 정전 용량(C)에 의한 추가의 전하량으로서 각 분역의 C 값은 대개 각 분역의 P가 클수록 또는 전위가 클수록 감소한다. 각각의 강유전 분역들의 P는 예를 들어  $Pb(Zr,Ti)O_3$ (PZT)와 같은 perovskite 결정의 경우 산소 팔면체의 가운데에 있는 +4가 양이온의 음이온에 대한 상대적 변위에 의하여 결정되는 값이다. 그런데 일반적인 다결정체 또는 박막의 외부에서 측정된 P는 이들 분역이 무질서한 상태에서 전계의 방향으로 정렬하면서 증가하는 방향 분극(orientation polarization)의 vector 합이다. 따라서 측정되는 P는 저 전위에서는 빠른 속도로 증가하다가(Fig. 1(a)의 A 영역) 고 전위에서 분역의 정렬이 완결되면 거의 전위가 증가해도 증가하지 않는다. (Fig. 1(b)의 B 영역) 고 전위에서 분극의 정렬이 완벽한 경우 전위의 증가에 따라 미약하게 증가하는 P가 있는 경우 이 증가는 각 분역결정의 단위포 내에서 양이온-음이온 사이의 거리가 증가해서 발생하는 이온 분극(ionic polarization) 성분의 증가에 의한 것으로서 대개의 경우 방향 분극의 증가에 비하여 미미하다. Virtual

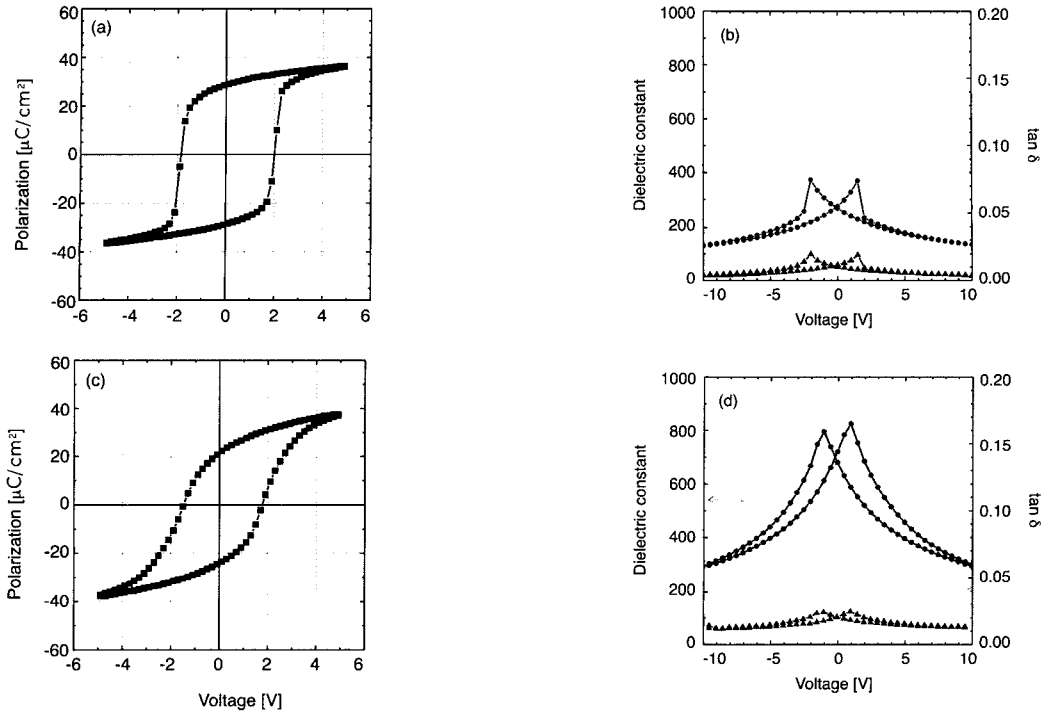


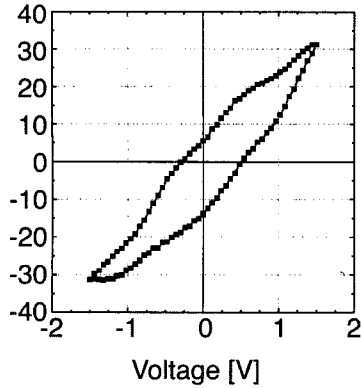
Fig. 3. (a) P-V and (b)  $\epsilon_r$ -V plots of (001) oriented, and (c) P-V and (d)  $\epsilon_r$ -V plots of (111) oriented PZT films.

ground mode에서 측정되는 전하의 이동은 이와 같은 방향 분극 또는 이온 분극의 증가에 따라 발생하는 것이다. 이 전하의 이동은 분역의 방향을 변화시키거나 분역 자체의 P 값을 비표준 정도로 크며 거의 DC에 가까운 성질을 갖는 전위에 의해 일어난다.

한편 저주파 C-V plot으로부터 측정되는 정전용량은 이상의 강유전분극과는 다른 물리량이다. 일반적인 C-V 측정에서는 분역 반전을 일으킬 수 있는 큰 값의 DC bias에 분역 반전이 되지 않게 수십 mV 정도의 작은 AC bias (주파수는 수 kHz에서 수백 kHz 정도) 전위를 인가하여 유전체의 반응을 측정한다. 이때 DC bias는 유전체가 작은 AC 신호에 반응하는 성질을 바꾸는 역할만을 하며 DC 신호 자체에 반응하는 전하량의 변화는 측정되지 않는다. 이는 Fig. 3에서와 같이 잘 만들어진 PZT 박막 강유전 capacitor의 C-V plot에서 잘 알 수 있다. 이 그림에서 잘 알 수 있듯이 강유전체(또는 (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub>와 같은 고유전체)의 경우 정전용량은 전위가 커질수록 감소한다. 만일 이 C-V plot이 전극에 저장된 전하량 전체를 측정하는 것이라면 식 1에 의하여 고 전위에서 더 큰 값

을 가져야 할 것처럼 보인다. 그러나 정전용량 C는 전하량 자체와는 아무런 관계가 없고 단지 전하량의 전위에 따른 변화( $C = \frac{Q}{V}$ ) 이므로 사실은 식 (1)과는 아무런 관계가 없다. 그러면 식 (1)에 따른 P-V 곡선을 V에 대하여 미분하면 C-V 곡선이 얻어 질까? 그렇지 않다. 이는 전술한 바와 같이 P-V와 C-V는 측정하는 물리량이 다르기 때문이다. 즉 P-V에서의 P는 각각의 분역이 갖는 P 자체를 재는 것이고 C-V의 C는 각 분역의 P가 AC 전계에 반응하는 정전용량을 재는데 특히 P-V의 경우에 비하여 대개 매우 높은 주파수의 전계에 반응하는 정전용량을 재는 것이다. 이를 좀더 명확하게 이해하기 위하여 다음과 같은 실험 결과를 보였다. Fig. 3(a)와 (b)는 Pt(001) 면 상에 형성된 집합조직 다결정 PZT(001) 박막의 P-V 이력 곡선과 동일한 시료의  $\epsilon_r$ -V 곡선이다. 한편 Fig. 3의 (c)와 (d)는 Pt(111) 면상에 형성된 집합조직 다결정 PZT(111) 박막의 P-V 이력 곡선과 동일한 시료의  $\epsilon_r$ -V 곡선이다. 예상할 수 있는 바와 같이(001) PZT 박막은 분극 방향과 결정학적 전계 인가 방향이 동일하므로 180° 분역벽(domain wall)의 이동이 작용하여 V<sub>c</sub>에서 매우

급격한 분극 반전을 보인다. 만일 C-V 곡선이 이 P-V



**Fig. 4.** Typical P-V hysteresis loop of a leaky dielectric film.

곡선의 미분으로 얻어 진다면 이와 같은 시료의 경우  $V_c$ 에서의 유전상수는 매우 큰 값을 갖게 될 것이다. 그러나 Fig. 3(b)와 (d)의 비교에서 볼 수 있듯이 오히려  $V_c$ 에서의 유전상수는 (111) 박막의 경우가 더욱 크다. 이와 같은 현상이 나타나는 원인은 다음과 같이 이해된다.

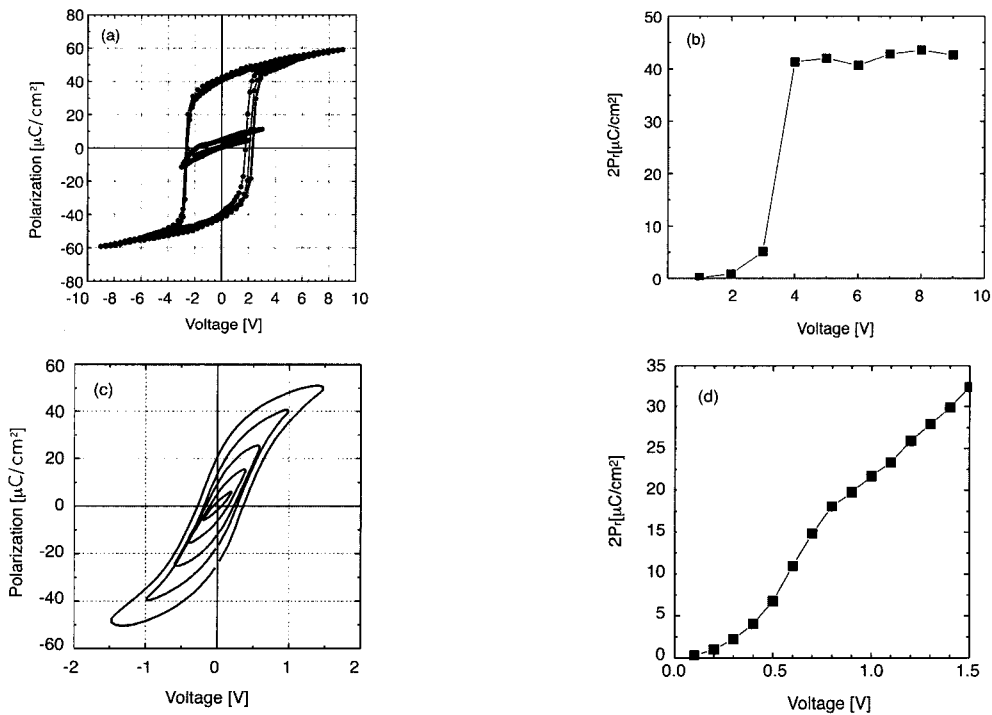
먼저  $V_c$ 에서는 전계 방향에서 보았을 때 모든 시편의 +/- 분역의 분포가 정확하게 양분되어 있다. 이때 (001)

PZT 박막의 경우 저주파 C-V에서 측정되는 유전상수는 양방향의 PZT(001) 축 방향을 따른 유전상수가 된다. 그런데 Perovskite 결정의 c-축방향에 따른 유전상수는 a-축 방향에 따른 유전상수보다 훨씬 작음이 잘 알려져 있다.<sup>3)</sup> 따라서 (001) PZT 박막에서 측정되는 C-V는 가장 작은 유전상수를 갖는 결정학적 축 방향을 따른 측정이 되고 (111) PZT 박막의 경우 a-축 방향의 유전 성분 일부가 C-V 측정에서 나타나기 때문에 오히려 유전율이 크게 된다.

Pulse switching 측정은 강유전체가 소자로 적용되었을 경우 보다 현실적인 특성 평가를 위한 것으로 측정 원리는 P-V 측정과 유사한데 가해지는 전위를 사각형의 pulse 형태로 가하고 그 폭을 micro sec 이하로 하여 순간적인 전위의 변화에 따라 반응하는 분극량을 측정하는데 사용된다.<sup>4)</sup>

### 3. 이력 곡선 측정에 영향을 주는 인자들

이상적인 절연체는 존재하지 않으므로 실험적으로 유전이력곡선을 측정하면 비록 상유전체라도 잔류분극



**Fig. 5.** (a) P-V loops and (b)  $P_r$ - $V_a$  curve of very insulating PZT and (c) P-V loops and (d)  $P_r$ - $V_a$  curve of leaky PZT films.

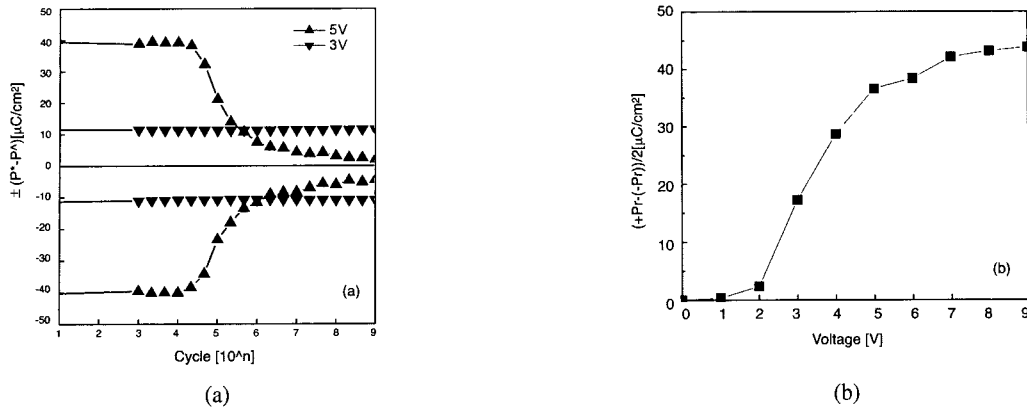


Fig. 6. (a) Variation of  $P_r$  as a function number of switching cycles with  $V_{cy}$  of under and over the saturation voltage, and (b) the corresponding  $P_r - V_a$  curve of a PZT capacitor.

과 항전계가 어느 정도는 나타나는 것을 알 수 있다. 강유전체는 기본적으로 양호한 절연체이지만, 실제로는 불순물의 첨가, 전극과 박막의 계면 문제, 박막의 품질 저하 등으로 인하여 어느 정도의 손실 값을 갖게 되고, 따라서 pulse를 가할 때 직류성분의 전기전도가 발생하게 된다. 이러한 직류 누설성분에 의하여 잔류분극과 항전계가 과대평가될 수 있는 위험성이 항상 있다. 예를 들어 Fig. 2(a)의 Sawyer-Tower 회로를 이용한 측정방법에서 시편의 일정한 전도성을 고려하여 시편을 대신하여 RC병렬회로 구성하면, Fig. 4에서 나타낸 것처럼 단순한 상유전체인데도 불구하고 마치 강유전체와 같은 결과로 측정된다. 시료의 저항 값이 작을수록 charging이 빨리 일어나게 되어 이력곡선이 과대평가될 수 있다.<sup>5)</sup>

강유전체의 경우라 하더라도 가해진 전위 ( $V_a$ )가 누설 전류를 과대하게 일으키는 경우에는 전위가 증가함에 따라 잔류분극값이 현저하게 증가하는 결과를 낳는다. Fig. 5 (a), (b)는 PZT 박막의 절연저항이 충분히 커서 누설전류가 P-V 이력 곡선 측정에 영향을 주지 않은 경우의 인가전압에 따른 P-V 곡선의 변화와  $P_r - V_a$  곡선이다. 거의 모든 분역이 전계의 방향으로 정렬되는 포화 전위(saturation voltage) 이상에서는  $P_r$ 의 변화가 거의 미미함을 알 수 있다. 그러나 Fig. 5(c), (d)의 경우와 같이 박막의 두께가 매우 얇거나(~40 nm) 절연저항이 작아서 고전위에서 누설전류가 과대해지는 경우 포화전위를 찾을 수 없고 P-V 이력 곡선의 모양도 뚱뚱해짐을 볼 수 있다.

이와 같은 경우는  $P_r$  값이 과대하게 측정된다. 어느 정도의 누설 전류가 이와 같은 영향을 미치는지는 절대적으로 판단되기는 어려운 것으로 보인다. 이는 단순히 누설 전류뿐 아니라 여러 가지 손실 요소들이 P-V 곡선의 형태에 영향을 주기 때문이다. 따라서 신뢰성있는  $P_r$  값을 얻기 위해서는  $P_r - V_a$  곡선을 얻어 보고 포화전위에서의  $P_r$  값을 얻는 것이 필요하다.

한편 측정시 사용하는 전위의 주파수 (또는 cycling time)에 따른 P-V 곡선의 변화도 나타난다. 대개 주파수가 증가하면  $P_r$ 은 약간 감소하고  $V_c$ 는 증가한다. 그러나 일반적으로 측정하는 수십 ~ 수백 HZ 영역에서 이 변화는 그리 크지 않다.

또한 실험적으로  $P_r$  값을 측정할 때 가장 쉽게 범하게 되는 잘못된 전극의 면적 측정오차에 기인한 것이다. 사진 식각 공정을 이용하여 전극의 면적을 정의하면 보통의 경우와 같이 수천 ~ 수만  $\mu\text{m}^2$  정도의 면적을 갖는 전극의 경우 정확한 면적을 알 수 있다. 그러나 대개는 sputtering 방법이나 e-beam evaporation 방법에 의하여 전극을 형성할 때 간편한 shadow mask 공정에 의하여 전극의 면적을 정의한다. 이때 대개 지름 100  $\mu\text{m}$  ~ 1000  $\mu\text{m}$  정도의 전극을 형성하게 되는데 면적을 원래 design한 mask의 구멍의 지름을 이용하여 계산한다. 그러나 실제로 형성된 전극의 형태와 크기를 광학현미경 등을 이용하여 관찰해 보면 원래의 형태나 크기와 매우 다름을 알 수 있다. 이는 mask를 시편에 빈틈없이 일치시키기 어렵고 많은 경우 mask 구멍 자체의 면적이 정

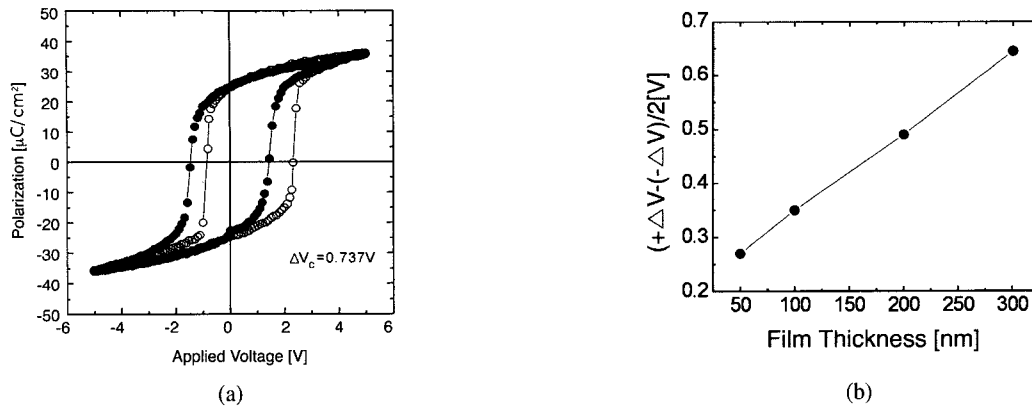


Fig. 7. (a) P-V hysteresis loops before and after the imprint test, and (b) variation of the imprint voltage as a function of the PZT film thickness.

확하지 않기 때문이다. 대개의 경우 실제 전극의 면적이 의도하였던 값보다는 크고 심한 경우 면적이 2배 가까이 되는 경우도 있다. 이때는 측정된  $P_r$  값이 실제보다 매우 크게 된다. 이와 같은 오차는 mask의 직경이 작을수록 심해진다. 경험에 의하면 mask 구멍의 직경이 100  $\mu\text{m}$  이하가 되면 실제로 형성된 전극의 크기를 거의 신뢰할 수 없게 된다. 이런 경우 측정된 전극을 기억하였다가 나중에 광학 현미경 등을 이용하여 실제 면적을 구하여야 한다. Mask 구멍의 직경이 크면 이와 같은 실험적 오차는 상대적으로 감소하나 시편 내에 존재하는 결함이나 외부의 먼지 등의 영향을 받아 capacitor가 failure를 일으킬 확률이 커지므로 적당한 크기의 전극 면적을 선택할 필요가 있다.

#### 4. 강유전체 박막의 이력곡선 신뢰성 평가

강유전체를 이용한 소자를 실제로 사용하려면 여러 가지 소자 장기 신뢰성에 관한 자료를 확보하여야 한다. 이는 강유전체의 여러 성질 중에서도 강유전성 자체가 반복되는 전위 변화나 장시간의 고온, 전계하 보관(baking) 등에 의하여 심한 변화를 보이기 때문이다. 여기에서는 대표적인 신뢰성 평가항목인 이력곡선의 fatigue, imprint, 그리고 retention에 관하여 설명하고자 한다.

Fatigue란 반복적인 분극 반전(switching)을 통해 잔류분극 값과 최대분극 값이 감소하는 현상을 말한다. 현재의 1T-1C방식의 강유전체 메모리(FerRAM)는 정보파

괴형 읽기(DRO, destructive read out) 방식으로 설계되어 있어 소자 작동 시 많은 횡수의 분극 반전을 견뎌야 한다. FerRAM이 DRAM처럼 사용되기 위하여 요구되는 분극반전 횡수는  $10^{15}$  이상이다. 이것은 주 40시간, 10년간 사용한다는 가정하에 계산된 수치이다.

강유전체 계열의 물질 중  $\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$ (SBT)와 같이 금속 전극상에서도 fatigue이 없다고<sup>6)</sup> 알려진 물질도 조성이나 제조 조건에 따라 fatigue가 종종 발견된다. Pb-계열의 강유전체 산화물의 경우 금속전극을 사용할 경우 fatigue 현상이 잘 일어난다. 이런 fatigue가 발생하는 것은 전하를 띤 어떤 입자의 재배열이 원인인 것은 틀림없으나 그 입자의 본질, 농도, 원인, 화학적 성질 등에 관해서는 아직도 매우 많은 논의가 진행되고 있으므로 여기에서 다루는 것은 적당하지 못하다. 단지 여기에서는 fatigue 측정 시에 주의 해야 할 사항을 기술하기로 한다.

Fatigue 측정 시 측정조건에 따라 전혀 다른 결과를 얻을 수 있는데, 특히 분극반전 인가전위 ( $V_{cy}$ )와 주파수는 측정결과에 큰 영향을 미칠 수 있다.<sup>7)</sup> Fig. 6(a)에서 나타난 것처럼, 동일한 PZT샘플이지만 단지  $V_{cy}$ 의 차이 의해 완전히 다른 결과를 얻을 수 있었다.  $V_{cy}$ 가 3V일 때  $10^9$  회까지 fatigue이 없는 것처럼 나타났지만  $V_{cy}$ 가 5V로 증가되면  $10^4 \sim 10^5$  회부터 심한 fatigue이 일어난다. 이것은 Fig. 6(b)에서 알 수 있듯이 인가전압에 의한 분극 반전 정도가 다르기 때문이다. 5V이하에서는 충분한 분극반전을 할 수 없기 때문에 fatigue특성



이 향상된 것처럼 나타난다. 즉 fatigue 측정 시 포화전압 이하에서 측정하면 fatigue가 일어나지 않은 것처럼 보일 수 있다. 따라서 fatigue 측정 시에는 충분한 분극 반전을 할 수 있는 포화전압 이상에서 측정해야 한다.

한편 Fig. 4에서와 같이 박막의 누설 전류 성분이나 손실에 기인한 이력 곡선을 보이는 시료의 경우는 fatigue 내성이 매우 우수한 것처럼 보인다. 특히 전술한 바와 같이 전극 면적이 잘못 추정된 경우 마치  $P_r$  값도 크고 fatigue 내성도 매우 우수한 것으로 착각 되기 쉬우므로 매우 주의하여야 한다. Fatigue를 정확히 측정하기 위하여서는  $P_r-V_a$ 를 반드시 얻어보고 포화전압이 존재하는지를 확인한 후 그 이상의 전압에서 fatigue 실험을 행하여야 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있다.

Imprint는 일정 전압이나 단일 극 전위 pulse를 지속적으로 받음으로써 반대쪽의 분극 반전이 어려워지는(또는  $V_c$ 가 커지는) 현상을 말한다. 이와 비슷한 것으로 한 쪽 분극방향으로 오래 놓아두면 역시 반대쪽의 분극 반전이 어려워지는 현상을 aging현상이라고 한다. Aging은 주로 열적인 과정에 의한 분역 안정화 혹은 분역 고정(domain pinning) 현상이고 imprint는 전기적 또는 열적 외부 응력에 의한 분역 안정화나 분역 고정 현상으로서 aging은 잔류 분극 값 자체가 줄어드는 것이지만 imprint는 이력 곡선이 한 쪽으로 쏠리는 경향을 보인다. Fig. 7(a)에는 PZT 강유전 박막 capacitor를 한 쪽으로 분극(poling) 시킨 후 150°C에서 4410초간 보관한 전 후의 이력곡선의 변화를 보여준다. 예측할 수 있는 것처럼 이와 같은 변화의 정도는 보관 조건(시간, 온도) 뿐 아니라 분극시 가해준 전계의 크기 등에 따라서도 변화하므로 imprint를 평가하기 위해서는 이와 같은 제반 사항을 정확하게 표기할 필요가 있다. Fig. 7(b)에서는 동일한 PZT박막의 두께에 따른 imprint 전위의 변화를 보여주고 있다. 두께가 증가함에 따라 imprint 전위가 직선적으로 증가하는 현상으로부터 imprint 현상은 박막과 전극의 계면 보다는 박막 내부 또는 전극 근처의 영역에서 일어나는 전하의 이동 현상과 관련이 있음을 알 수 있다.<sup>8)</sup>

Retention 이란 시간에 따른 data의 저장 보존 능력을 말하는 것으로 위의 imprint, aging 현상 및 fatigue등이

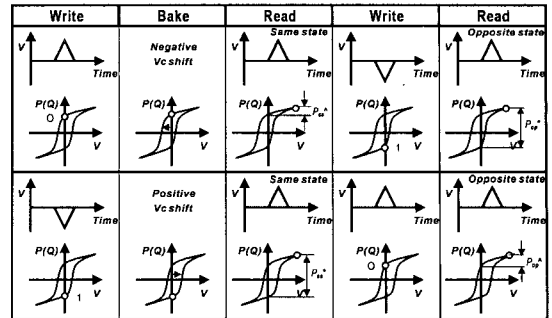


Fig. 8. Sequences of the opposite state retention test.

직접, 간접적으로 영향을 준다. DRO 방식의 FeRAM에서는 분극 반전 때의 전하량의 변화(data 1에 해당, Fig. 8의  $P^*$ )와 비반전 때의 전하량의 변화(data 0에 해당, Fig. 8의  $P^{\wedge}$ )가 bit-line에 유도하는 전위차를 이용하여 data 1과 0을 구분한다. 그런데 실제 소자가 동작 될 때는 어떤 cell에 data 1이 저장되고 난 후 일정 시간이(또는 장시간이) 경과한 후 그 1을 읽고 다시 1을 쓰거나 또는 0을 쓰는 두 가지 경우가 존재하게 된다. 물론 다른 cell에는 data 0이 저장되고 난 후 그 0을 읽고 다시 0을 쓰거나 1을 쓰는 두 가지 경우도 존재하게 된다. 처음에 1 또는 0을 쓰는 위 두 가지 경우는 강유전 capacitor의 성능 면에서 보면 동일한 경우에 해당하므로 신뢰성 측면에서는 한가지의 경우만 고려하면 된다.

위의 data 1을 먼저 쓴 경우에 그 cell을 고온에서 장시간 보관하면 imprint가 일어나게 되어 1의 data가 0의 data 보다 안정하게 된다. 즉 1을 쓴 cell을 고온에서 장시간 보관 후 1을 읽고 다시 1을 쓴 후 그 1을 읽어보면 안정한 신호로 잘 읽어 지지만 1을 읽고 0을 쓴 후 그 0을 읽어 보면 신호가 불안정하고 잘 읽어지지 않는다. 이와 같은 test를 반대 상태 유지성 평가(opposite state retention test) 라고 하는데 FeRAM 동작 mode test 중 에서 가장 통과하기 어려운 test mode이다. 다음에서 이와 같은 test 과정을 설명하고 다시 그 과정의 이해를 돕기 위하여 Fig. 8에 그림으로 나타내었다.

실제 cell에서 측정된 자료는 Fig. 9에 나타나 있다. Fig. 9는 집적화된 SBT capacitor에서 얻은 자료로서 최소 신호 sensing margin에 해당하는  $P_{op}^* - P_{op}^{\wedge}$  값이 어떤 cell을 한 data 상태로 10년 동안 유지한 후에도 일정

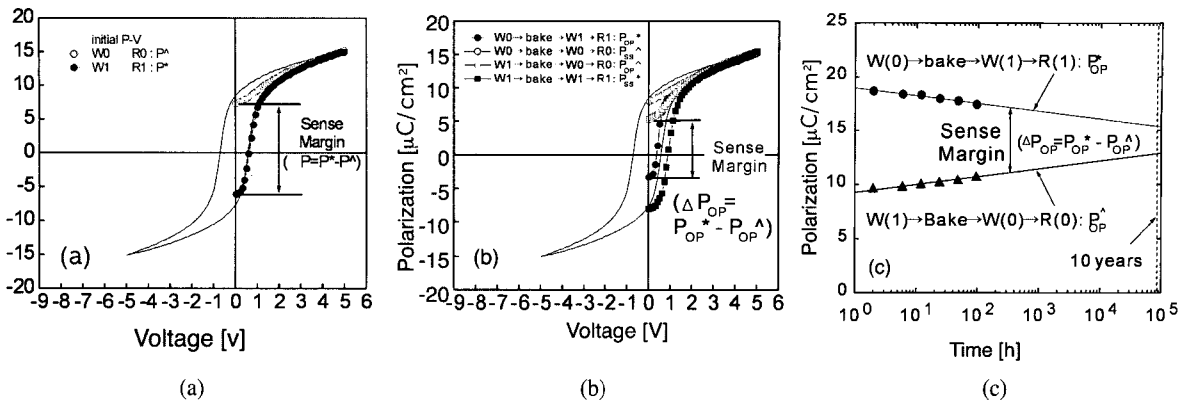


Fig. 9. (a) The P - V hysteresis loop of the fresh SBT capacitors, measured with a continuous positive and negative triangular pulse train with peak voltages of +5 V and -5 V. The figure also shows variations in polarization with a triangular pulse with a maximum voltage of + 5V after the capacitors were polarized to +P<sub>r</sub> (P<sup>^</sup>) and -P<sub>r</sub> (P<sup>\*</sup>), respectively. (b) shows the results from a pulse switching test with a positive triangular pulse having the same amplitude after baking at 150°C for 6 h and (c) shows variations in P<sub>OP</sub><sup>\*</sup> and P<sub>OP</sub><sup>^</sup> as a function of baking time under the opposite retention test conditions.

값 이상이 되어 그 cell이 정상적으로 동작함을 나타낸다.

먼저 하나의 cell을 선택하여 양(+) 부호의 짧은 전위 pulse를 가하여 +P<sub>r</sub> 상태로 만든다(W(0), data 0을 쓴다). 그리고 이 cell을 고온(100~150°C)에서 시간을 변화 시켜 가면서 장시간 보관(baking)한다. 이와 같은 보관이 끝난 후 다시 양부호의 전위 pulse를 가하여 이때의 전하량의 변화(P<sup>^</sup>)를 읽는다(R(0), data 0을 읽는다). 이 단계는 cell의 aging을 평가하는 것에 해당한다. 이후에 이 cell에 음부호의 전위 pulse를 가하여 -P<sub>r</sub> 상태로 만든다(W(1), data 1을 쓴다). 그리고 이 상태에서 다시 양부호의 전위 pulse를 가하여 이때의 전하량의 변화(P<sub>OP</sub><sup>\*</sup>)를 읽는다(R(1), data 1을 읽는다). 이 과정을 정리하면 다음과 같다.

W(0) → bake → R(0) → W(1) → R(1) :  
이때의 신호는 P<sub>OP</sub><sup>\*</sup>

즉 처음 data를 쓰고 baking 후 처음 쓴 data (0)와는 반대 data (1)를 쓰고 읽어 본다. 이때 data 0 상태가 안정하므로 (+P<sub>r</sub> 상태가 imprint에 의하여 안정화 되었으므로) data 1은 불안정 (-P<sub>r</sub> 값이 줄어들어 있으므로) 하게 된다(이때 마지막 data 1을 표시하는 신호가 P<sub>OP</sub><sup>\*</sup>). 이에 비하여 동일 상태 안정성 평가(same state retention

test)는 다음과 같은 과정으로 이루어 진다.

W(1) → bake → R(1) → W(1) → R(1) :  
이때의 신호는 P<sup>\*</sup>

즉 처음에 1을 쓰고 baking 한 후 최종적으로 다시 1을 쓰고 읽기 때문에 마지막 data 1을 읽는 데에 문제가 없다(이때 마지막 data 1을 표시하는 신호가 P<sup>\*</sup>, P<sup>\*</sup> > P<sub>OP</sub><sup>\*</sup>).

한편 인접cell을 선택하여 위와 반대의 조작을 한다. 즉 먼저 음(-) 부호의 짧은 전위 pulse를 가하여 -P<sub>r</sub> 상태로 만든다(W(1), data 1을 쓴다). 그리고 이 cell을 고온에서 시간을 변화 시켜 가면서 장시간 보관 한다. 이와 같은 보관이 끝난 후 다시 음부호의 전위 pulse를 가하여 이때의 전하량의 변화(P<sup>^</sup>)를 읽는다(R(1), data 1을 읽는다). 이후에 이 cell에 양부호의 전위 pulse를 다시 가하여 +P<sub>r</sub> 상태로 만든다(W(0), data 0을 쓴다). 그리고 이 상태에서 다시 양부호의 전위 pulse를 가하여 이때의 전하량의 변화(P<sub>OP</sub><sup>^</sup>)를 읽는다(R(0), data 0을 읽는다).

W(1) → bake → R(1) → W(0) → R(0) :  
이때의 신호는 P<sub>OP</sub><sup>^</sup>

이상과 같은 조작이 끝난 후 두개의 cell의 최종 전위



량의 차이 ( $P_{op}^* - P_{op}^{\wedge}$ )가 최종적인 가장 나쁜 상태의 test 이후의 신호가 된다. Fig. 9에는 이상과 같은 과정에 의하여 측정된  $P_{op}^*$ 과  $P_{op}^{\wedge}$ 이 보관 시간이 증가함에 따라 각각 감소하고 증가하여 그 차이가 줄어들어(즉 최소 신호 sensing margin이 감소함)이 나타나 있다.

## 5. 결 론

강유전체는 그 독특한 성질로 인하여 많은 물리적 현상에 대한 학문적 탐구의 대상일 뿐 아니라 여러 가지 유용한 실제적 소자의 재료이기도 하다. 많은 응용 중에서 근래에는 FeRAM 응용에 관한 많은 연구가 있어 왔고 이제는 실용화 단계에 들어서 있다. 이에 따라 국내외에서 수 많은 강유전체 박막 capacitor의 제작 및 특성 평가에 관한 보고가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 이와 같은 강유전체 박막 capacitor의 강유전 특성을 평가하는 기본적인 방법론을 논의 하였다. 특히 본 논문에서는 이와 같은 평가 시에 흔히 발생하는 오류 요인들에 관해서 논의하고 실제적인 소자 응용을 위하여 필요한 특성 평가 방법에 관하여 설명하고자 노력하였다.

최근 들어서는 지난 10여년간의 많은 연구와 투자에도 불구하고 FeRAM이 양산되지 못하고 있는 현실에 대한 회의가 생기고 있고 이에 대한 대안으로서 MRAM이나 PRAM 등에 대한 논의와 연구도 활발해지고 있다. 그런데 약 10여년 전 강유전체 메모리에 대한 논의와 연구가 활발히 시작되었을 때 오늘날 MRAM 또는 PRAM

에 대한 것과 매우 유사한 장미빛 전망이 제시되었었다. FeRAM은 그 동안의 수많은 문제 제기와 논의를 거쳤기 때문에 좀더 실용화, 양산화에 근접해 있는 것으로 판단된다. 양산화는 단지 기술적인 측면 만이 아니고 시장의 상황, 응용시스템, 경쟁 제품의 발전 추이 등 많은 요인이 영향을 준다. 그러나 궁극적으로는 제품 자체가 가지는 기술력이나 성능의 우수성이 양산가능성과 제품의 경쟁력을 좌우하기 때문에 아직도 부단한 연구 개발이 요구되고 있다. 오히려 이제까지 보다 훨씬 어려운 문제와 까다로운 요구조건이 제시되고 있으므로 더 큰 연구 개발 노력이 요구된다.

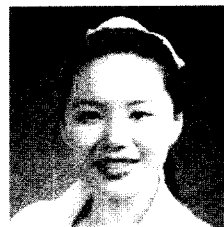
## 참고 문헌

1. W. D. Kingery, H. K. Bowen and D. R. Uhlmann, *Intoroduction to ceramics* (John Wiley & Sons, New York, 1976).
2. J. F. Scott, *Ferroelectric Memories* (Springer, 2000).
3. B. Jaffe, W. R. Cook and H. Jaffe, *Piezoelectric Ceramics*, (Academic Press, 1971) p. 72.
4. D. J. Taylor, P. K. Larsen, G. J. M. Dormans and A. E. M. De Veirman, *Integ. Ferroelec.* 7, 123 (1995).
5. J. H. Park, *J. Korea. Ceram. Soc.*, **38**, 667 and (2001)
6. J. F. Scott, *Ferroelectric Memories* (Springer, 2000) p.153.
7. M. Grossmann, O. Lohse, D. Bolten, U. Boettger, R. Waser, W. Hartner, M. Kastner and G. Schindler, *Appl. Phys. Lett.* 76, pp. 363(2000).
8. S-H. Kim, H-J. Woo, J. Ha, C. S. Hwang, H. R. Kim and A. I. Kingon, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 2885 (2001).



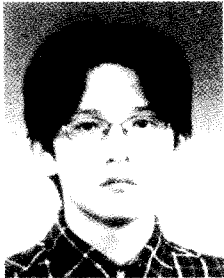
조금석

- 1998년 연변과학기술대학교 재료 및 기계학과 학사
- 2001년 고려대학교 재료공학과 석사
- 현재 서울대학교 재료공학부 박사과정



임지은

- 2001년 홍익대학교 금속재료공학과 학사
- 2001년 서울대학교 재료공학부 석사과정
- 현재



**권오성**

- 1999년 서울대학교 재료공학부 학사
- 2001년 서울대학교 재료공학부 석사
- 2001년 현 서울대학교 재료공학부 박사과정



**황철성**

- 1987년 서울대학교 무기재료공학과 학사
- 1989년 서울대학교 무기재료공학과 석사
- 1993년 서울대학교 무기재료공학과 박사
- 1993년 미국표준연구소 객원연구원
- 1994년
- 1994년 삼선전자 반도체연구소
- 1997년 선임연구원
- 1998년 서울대학교 재료공학부 조교수
- 2002년
- 2002년 서울대학교 재료공학부 부교수
- 현재



**김승현**

- 1989년 연세대학교 공학학사
- 1991년 연세대학교 대학원 공학석사
- 1996년 연세대학교 대학원 공학박사
- 1998년 North Carolina State University : Post-doctor
- 2000년 North Carolina State University(Materials Research Center) : Research Staff
- 2000년 INOSTEK(주) 기술연구소
- 현재 기술담당 이사



**이동수**

- 1988년 서울대학교 무기재료공학과 학사
- 1991년 서울대학교 무기재료공학과 석사
- 1991년 동양중앙연구소 선임연구원
- 1998년
- 2001년 서울대학교 재료공학부 박사
- 1998년 이노스텍(주) 기술사업부 이사
- 현재