

論文2000-37SD-5-1

단결정립 PZT 박막의 피로 및 정보 유지 특성에 관한 연구

(A Study on the Fatigue and Data Retention Characteristics of Single Grained PZT Thin Films)

李章植*, 朱承基*

(Jang-Sik Lee and Seung-Ki Joo)

요 약

PZT seed에 의해 형성된 단결정립 PZT 박막을 이용하여 Pt/PZT/Pt 구조에서의 피로(fatigue) 및 정보 유지(data retention) 특성에 관하여 연구하였다. 피로 특성의 경우 1MHz의 주파수에서 $\pm 10V$ 의 square wave를 인가하여 측정된 결과 2×10^{11} cycle 동안 전혀 특성의 변화가 관찰되지 않았으며, 정보 유지 능력의 경우 상온에서 30000초 동안 기억 상태의 변화가 없었으며, 고온에서의 retention 측정으로 계산된 활성화 에너지로부터 구한 상온에서의 20% 잔류분극값 감소를 보이는 시간은 6.6×10^7 년이었다.

Abstract

Fatigue and data retention characteristics of the Pt/PZT/Pt structure using single grain PZT thin films by PZT seeding method were investigated. In case of fatigue, there is no loss in switched polarization up to 2×10^{11} cycles using 1MHz square wave form at $\pm 10V$ and no data loss after 30000sec of memory retention at room temperature. From the activation energy measured at high temperatures, the time required 20% loss in remanent polarization is estimated to be 6.6×10^7 years at room temperature.

I. 서 론

최근 정보통신 시대에 접어들면서 통신기기를 비롯한 모든 전자기기는 휴대 가능한 제품으로 되어가고 있다. 따라서 이들 제품은 소형화와 더불어 기기에 입력된 정보가 전원의 공급유무와 무관하게 기억되어야 하는 필요성 때문에 기존의 자성을 이용하는 기억장치

에서 반도체 기억소자로 급격히 대체되어가고 있다^[1]. 이러한 비휘발성 반도체 기억소자로는 EPROM (Electrically Programmable Read Only Memory), EEPROM (Electrically Erasable and Programmable Read Only Memory), flash memory 등이 있는데 기존의 휘발성 메모리인 DRAM (Dynamic Random Access Memory)에 비해 공정이 복잡하고 집적도가 떨어져 새로운 비휘발성 반도체 소자가 요구되고 있는데^[1] 강유전체 박막을 이용하는 FRAM (Ferroelectric Random Access Memory)이 가장 유망한 방법으로 제안되고 있다. FRAM은 구조가 간단하고 기존 DRAM의 공정을 그대로 적용할 수 있으며 전원 공급이 차단되어도 정보가 그대로 유지되어 전자기기뿐만 아니라 smart card, 전자 주민카드 등에도 유용한 제품이어서 현재 많은 연구가 집중되고 있다^[2-7].

* 正會員, 서울大學校 材料工學部

(School of Materials Science and Engineering, Seoul National Univ.)

※ 이 논문은 1999년도 한국과학재단의 우수연구센터 지원과제에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

接受日字:1999年10月23日, 수정완료일:2000年4月25日

FRAM 소자에 적용하기 위한 가장 유망한 강유전체 물질이 PZT이다^[2]. PZT는 bulk 상태에서 FRAM에서 필요로 하는 높은 유전상수, 낮은 누설전류, 높은 분극 특성을 보이고 있는데^[8] 이를 소자화하기 위해 박막으로 가공하였을 때 동작 전압에서의 큰 누설전류(leakage current)와 낮은 파괴전장(breakdown field)뿐만 아니라, 동작을 반복함에 따라 특성이 저하되는 전기적 피로(fatigue) 현상, 시간에 따라서 정보가 손실되는 노화(aging) 현상 등과 같은 열화 현상 때문에 실용화에 제한을 받고 있다^[9-15].

특히 피로 및 노화 현상의 경우 현재 PZT 박막을 강유전체 기억 소자로의 적용 시에 큰 문제점으로 제기되고 있는 현상이다^[2,4,9-20]. 강유전체 박막을 이용하는 소자의 경우 정보 저장 및 읽기를 위해 필연적으로 switching 과정이 필요하게 되며, 이러한 switching으로 인하여 나타나는 현상이 피로 현상이다^[9,11,12,16]. 피로란 읽기·쓰기를 반복함에 따른 잔류분극값의 감소 현상을 말한다. 노화 현상은 기억된 정보가 시간이 지남에 따라 소실되는 현상을 말한다^[2,17-20]. 노화 현상의 경우 최근 많은 연구가 진행되고 있으나, 상온에서도 시간이 지남에 따른 정보 저장 능력의 감소, 즉 잔류분극값의 감소를 보고하고 있다^[19,20]. 특히 Pt 전극을 상·하부 전극으로 사용하였을 경우 이러한 피로 및 노화 현상이 심화되어 현재는 Pt 전극만으로 상·하부 전극을 사용하는 다결정 PZT 박막은 실제 FRAM 제조 공정에 적용되지 못하고 있다.

본 연구에서는 기존 발표된 PZT seed를 이용한 단결정립 PZT 박막^[21,22]을 이용하여 Pt/PZT/Pt 구조에서의 피로 및 노화 특성을 측정하였으며, 특히 고온에서의 retention 측정을 통하여 구한 활성화 에너지(activation energy)로부터 상온에서의 life time을 예상하고자 하였다.

II. 실험 방법

모든 시편은 Si(100) 웨이퍼를 열산화시킨 SiO₂(500nm) wafer를 황산(H₂SO₄)과 과산화수소(H₂O₂) 1:1 용액에서 10분, 완충불산용액(Buffered HF solution)에서 10초 동안 세정한 뒤, DC magnetron sputtering에 의해 350°C에서 Pt(200nm)을 입힌 기판을 사용하였다. 형성된 Pt 박막의 경우 (111) 우선 배향성

을 가짐을 XRD를 통해 확인하였다.

3-gun magnetron co-sputter 장치에 Pb, [Zr,Ta], Ti 금속 타겟을 이용하여 반응성 스퍼터링으로 PZT 박막을 형성하였다. 스퍼터링 가스 유량비는 Ar:O₂=1:9였다. 초기 진공을 10⁻⁵ torr 이하로 유지한 뒤 350°C로 기판을 가열하면서 공정압력 20mTorr인 조건으로 PZT 박막을 증착하였다. 박막 증착 전 pre-sputtering을 10분 이상하여 반응성 스퍼터링시 타겟 표면산화 정도를 안정화시켜 증착 조건을 일정하게 유지하였다.

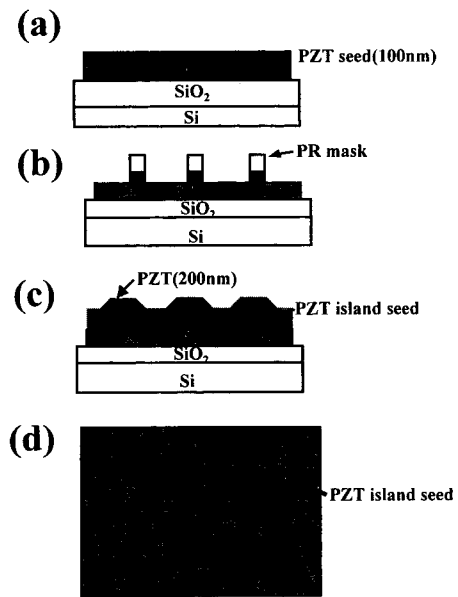


그림 1. PZT seed를 이용한 단결정립 PZT 박막 형성 공정의 개략도

- (a) seed 층 증착 및 RTA를 이용한 결정화
- (b) 사진 식각 공정에 의한 patterning 및 습식 식각
- (c) PZT seed가 형성된 기판 위에 상부 PZT 증착
- (d) 위에서 본 시편 구조

Fig. 1. Schematic illustration of lateral crystallization of PZT thin films by PZT seeding.

- (a) seed layer deposition and crystallization at 700°C by RTA method.
- (b) patterning by photo-lithography and wet etching of the seed layer.
- (c) top PZT thin film deposition on the PZT island seed.
- (d) plane view of the specimen.

Seed layer 형성을 위해 1000Å의 PZT 박막을 형성한 뒤 700°C에서 30초간 급속열처리(RTA) 방법으로

결정화시켰다. 일반적인 사진식각(photo lithography) 공정을 통해 $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ 크기, $40\mu\text{m}$ 간격으로 PR (Photo Resist) pattern을 하고 완충불산용액(Buffered HF solution)을 이용해 PZT 막을 에칭한 후 PR을 제거하였다. 이렇게 형성된 시편 위에 동일한 방법으로 2000Å 두께의 PZT 박막을 증착하였다. 시편 제조 방법 및 구조에 대한 모식도를 그림 1에 나타내었다.

단결정립 PZT 박막의 유전 특성을 평가하기 위하여 PR(Photo Resist)를 이용한 lift-off 방법으로 $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ 크기의 Pt 상부전극을 결정립계가 없는 부분에 형성시켜 특성을 측정하였다. 제조된 시편의 결정화 과정은 광학현미경으로 관찰하였으며, 분극 특성, 피로 특성 및 retention 측정은 Radiant사의 RT66A로 측정하였다. 분극 특성 및 피로 특성 측정은 상온에서 행하였고, retention 특성은 상온 및 고온에서 측정하였다. 피로 특성 측정을 위하여 RT66A에 function generator를 연결하여 1kHz와 1MHz의 주파수에서 $\pm 10\text{V}$ 의 전압을 인가하여 측정하였다.

III. 실험결과 및 고찰

그림 2는 열처리 온도에 따른 PZT 박막의 선택적인 성장을 나타낸 편광 현미경 사진이다. 산소분위기의 580°C 에서 2시간 동안 열처리하였을 때 seed로부터 윗 PZT 박막이 약 $6\mu\text{m}$ 정도 선택적으로 결정화되었고(그림 2(a)), 추가적으로 600°C 2시간의 열처리에 의해 측면으로 결정화가 진행되어 바로 옆에서부터 결정화된 결정립들과 만나 바둑판 모양의 PZT array를 얻을 수 있었다(그림 2(b)). 이 방법에 의해 기존의 불규칙적 핵 생성 및 성장에 의한 방법과 달리 seed 위치를 조절함에 따라 결정립계의 위치를 정확하게 조절할 수 있었다.

그림 2(b)의 단결정립 PZT 박막을 이용하여 피로 및 노화 특성에 대하여 알아보았다.

PZT 박막에서의 피로 현상이란 쓰기·읽기를 반복함에 따라 잔류분극값이 감소되는 현상을 말한다. 이러한 잔류분극값의 감소는 읽기와 쓰기의 동작이 모두 분극값에 의존하는 강유전체 비휘발성 기억소자의 경우 소자의 수명을 결정하는 중요인자가 된다. 잔류분극값의 감소는 두 개의 로직상태(logic states)의 구별능력이 감소되는 현상으로 이어지며, 결국에는 두 상태의

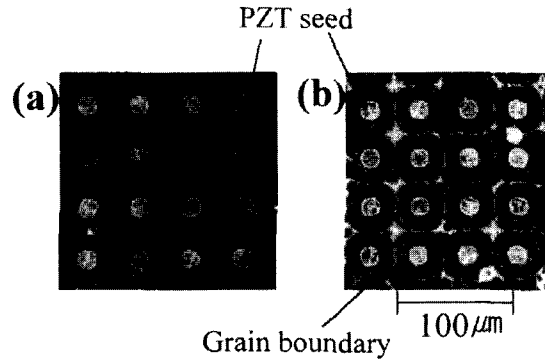


그림 2. PZT seed로부터 측면 성장한 현미경 사진
(a) 580°C 에서 2시간 열처리한 경우
(b) (a)의 경우에 600°C 에서 2시간 열처리를 더한 경우

Fig. 2. Evolution of the lateral growth from the PZT seed.
(a) after annealing at 580°C for 2hours.
(b) after addition of heat treatment at 600°C for 2hours to (a).

구별이 불가능하게 되어 소자의 오동작을 유발한다. 그림 3(a)에는 1MHz의 주파수에서 $\pm 10\text{V}$ 의 square wave를 인가한 경우의 피로 특성이다. x축은 cycle의 로그값을, y축은 switched polarization($P^* - P^*$)를 나타낸다. 1MHz의 주파수에서 switched polarization 값은 2×10^{11} cycle 동안 전혀 특성의 변화가 없음을 확인할 수 있었으며, 2×10^{11} cycle 동안 측정하였다. Pt 전극을 사용한 기존의 다결정 PZT 박막의 경우 $10^5\sim 10^6$ cycle 후부터 피로 현상에 의한 잔류분극값의 감소가 일어나는데 반해 본 연구에서의 단결정립 PZT 박막의 경우 2×10^{11} cycle 동안 전혀 특성의 변화가 없는 우수한 신뢰성을 나타내었다. PZT 박막을 비롯한 강유전체 물질의 경우 유전 특성과 전기적 특성 그리고 피로 특성 등 모든 특성은 주로 PZT 박막 내의 산소 공공(vacancy)이 밀집되어있는 결정립계에 의해 결정된다는 기존의 연구결과^[10,14]로 볼 때 본 연구에서의 결정립계가 조절된 단결정립 PZT 박막의 경우 특성열화의 원인이 제거된 상태이므로 다결정 박막에 비해 아주 우수한 PZT 특성을 보이는 것으로 나타났다.

일반적인 피로 특성 측정에 있어 높은 주파수의 전압을 가하게 되면 PZT 박막 내의 분극 현상을 나타내는 이온들이 빠른 주파수를 따라가지 못하게 되어 실제의 경우보다 피로 현상이 줄어드는 경우가 발생하게 된다는 보고가 있어 왔다. 따라서 본 연구에서는 1kHz

의 저주파에서의 피로 특성도 함께 측정하였으며, 이를 그림 3(b)에 나타내었다. 1kHz의 주파수의 경우에도 1MHz의 경우와 마찬가지로 cycle의 증가에 따른 피로 현상은 보이지 않았으며, 4.4×10^7 cycle까지 측정하였다.

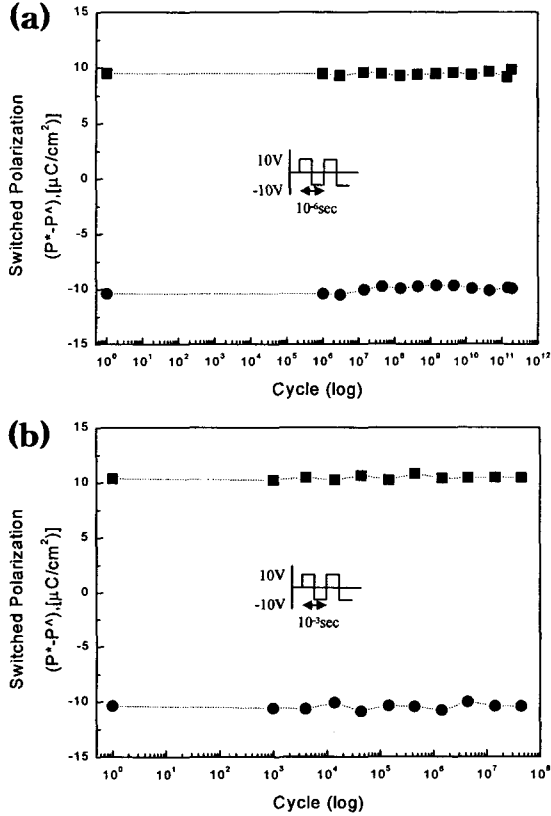


그림 3. 1MHz(a)와 1kHz(b)에서 $\pm 10V$ 의 사각형 형태의 파형을 인가한 경우 피로 특성

Fig. 3. Ferroelectric polarization retained following cyclic fatigue tests performed using 1MHz(a) and 1kHz(b) square wave form at $\pm 10V$.

PZT 박막의 노화(aging) 현상 중에서 retention의 경우, 쓰기를 행한 후 저장된 기억 상태가 시간이 지남에 따라 감소하는 현상을 말한다. 이러한 retention은 실제 비휘발성 기억소자로 사용되기 위해 중요한 특성으로써 기억 소자로서의 상품화를 위해 우수한 특성이 요구되는 사항이다.

그림 4에 retention 측정에 사용된 pulse에 대하여 나타내었다. 그림 4(a)의 경우는 쓰기 전압을 (-) 부호로 가할 때를 의미하며, (b)는 쓰기 전압을 (+) 부호로 인

가할 때의 pulse sequence이다. 본 연구에서 writing voltage와 reading voltage는 각각 10V로 고정하였으며, 쓰기 전압을 가할 때의 pulse 간격(t_1)은 $8.6 \mu\text{sec}$, 읽기 전압을 가할 때의 pulse 간격(t_2)은 2msec로 하였다. RT66A tester의 경우 retention 측정시 retention 시간이 지난 후 4번의 측정값을 저장하게 되는데 이를 그림에 표시하였다(P^* or P^r , P^*r or P^r , $-P^*$, $-P^*$).

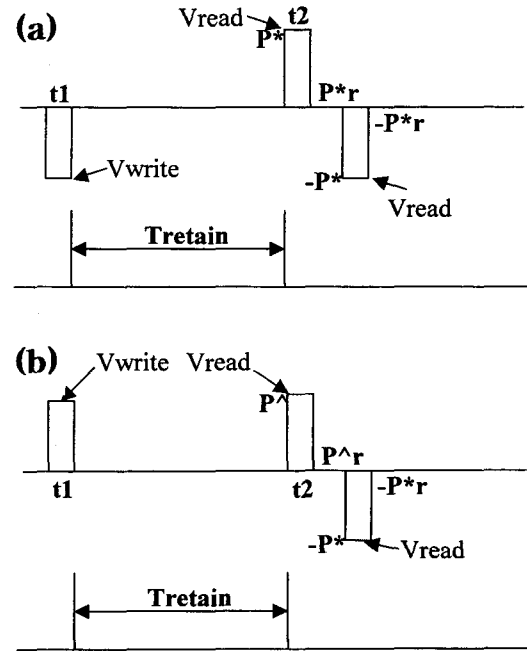


그림 4. Retention 측정 시 사용되는 pulse 신호
(a) - 부호의 쓰기 전압.
(b) + 부호의 쓰기 전압.

Fig. 4. Test pulse sequence for retention measurement.

(a) - sign write voltage.
(b) + sign write voltage.

그림 5에는 쓰기 전압의 부호를 바꿔서 측정한 retention 결과를 나타내었다. x축은 시간의 로그값을, y축은 P^* or P^r , P^*r or P^r , $-P^*$, $-P^*$ 의 네가지의 분극값을 나타낸다. 쓰기 전압이 $-10V$ 인 경우에는 $-Pr$ 로 기억 상태가 저장된 경우이며, $+10V$ 인 경우에는 $+Pr$ 로 기억 상태가 저장된 경우이다. 그림 5(a)에 $-10V$ 로 기록한 후 저장 시간을 1초부터 30000초까지 유지한 상태에서의 retention 측정 결과이다. 초기에 저장된 기억 상태를 30000초까지 그대로 유지함을 확인할 수 있었다. 그림 5(b)에는 $+10V$ 로 기록한 후 저장시킨 상태에

서의 retention 특성이다. 그림 5(a)와 (b)에서 확인할 수 있듯이 단결정립 PZT 박막의 경우 쓰기 전압의 부호의 관계없이 기억 상태를 상온에서 30000초까지 잔류분극값의 감소 없이 저장 가능하였다.

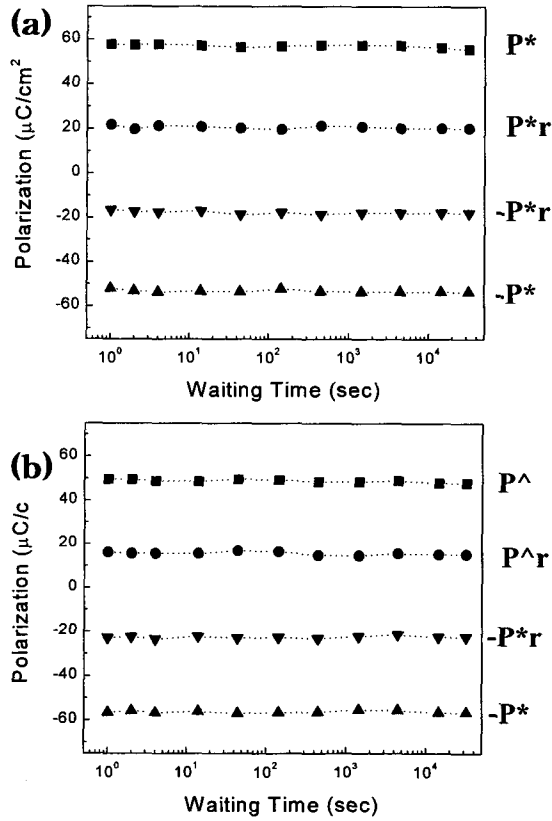


그림 5. -10V 쓰기 전압을 인가한 경우(a)와 +10V 쓰기 전압을 인가한 경우(b)의 단결정립 PZT 박막의 시간에 따른 retention 특성

Fig. 5. Time dependence of retention properties of single grain PZT thin films with -10V writing voltage(a) and +10V writing voltage(b).

일반적인 retention 특성의 경우 다결정립 PZT 박막의 경우에는 상온에서의 측정에서도 기억 상태의 감소, 즉 잔류분극값의 감소를 나타내며, 따라서 상온에서의 측정으로도 열화 현상을 충분히 확인할 수 있다. 그러나 본 연구에서의 단결정립 PZT 박막의 경우 상온에서의 잔류분극값의 감소를 전혀 나타내지 않았으며 또한 상온에서의 특성 변화를 측정하기 위해서는 오랜 시간이 필요하리라 예상되므로, 고온에서의 retention 측정 결과로 상온에서의 수명(life time)을 예측하는 가

속 측정(accelerated test)을 행하였다.

150, 165, 175, 190, 205°C의 각각의 온도에서 측정된 retention 측정 결과를 그림 6에 나타내었다. x축은 시간의 로그값을, y축은 잔류분극값의 normalized value를 나타낸다. 상온에서 측정된 retention 결과와는 달리 고온에서는 저장된 기억 상태의 저하를 보였다. 온도가 높아질수록 잔류분극값의 감소는 빠른 시간에 일어났다. 150°C 이상의 온도에서 측정된 결과 대부분 10초 이내에 잔류분극값의 10% 정도의 감소를 보이다가 어느 정도 완만한 구간을 거친 후 다시 빠른 속도의 열화 현상을 나타내었다.

일반적인 반도체 공정에서는 고온에서의 가속 측정에서 50%의 failure가 일어날 때를 MTF(mean time to failure)로 하여 제품의 수명을 예상하는 것이 일반적으로 적용되고 있다^[23]. 본 연구에서는 잔류분극값의 20% 감소할 때를 failure time으로 설정하였다. 150, 165, 175, 190, 205°C의 온도에서 잔류분극값의 20% 감소하는 시간은 각각 18844, 3044, 180, 125, 16초였다.

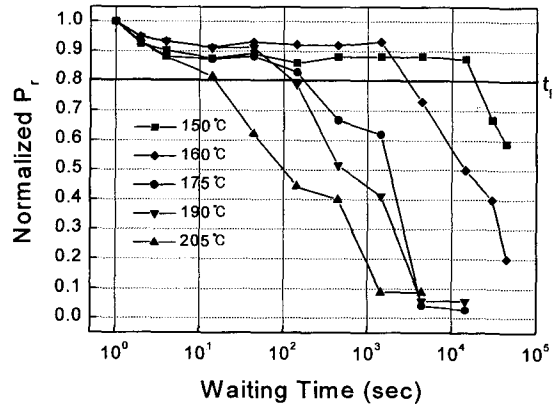


그림 6. 150, 165, 175, 190, 205°C 각각의 온도에서 단결정립 PZT 박막의 시간에 따른 retention 특성

Fig. 6. Charge retention characteristics of single grain PZT thin films for storing temperatures of 150, 165, 175, 190, 205°C as a function of time.

각각의 retention 측정 온도에서 잔류분극값이 20% 감소했을 때까지의 시간으로부터 다음과 같은 Arrhenius 식으로부터 활성화 에너지(activation energy)를 계산하였다^[24].

$$R = R_0 \exp(-Ea/kT) \quad (1)$$

여기서 R 은 rate constant, R_0 는 constant related to the activation entropy, E_a 는 활성화 에너지, k 는 볼츠만(Boltzmann) 상수이고 T 는 절대 온도이다.

각각의 온도에서의 failure가 일어날 때까지의 시간은 다음과 같은 식으로 나타내어진다.

$$t_F = \frac{\text{constant}}{R} = \text{constant} \times \exp(E_a/kT) \quad (2)$$

식 (2)의 각 변에 \log 를 취해 나타내면 다음과 같은 식이 되며, $\ln t_F$ vs. $10^3/T$ 를 그림 7에 나타내었다.

$$\ln t_F = \text{constant} + E_a/kT \quad (3)$$

본 연구에서의 활성화 에너지는 2.2eV였다. 이 값은 기존 RAMTRON^[25]에서 보고한 활성화 에너지인 0.72eV보다 3배 정도 큰 값을 보인다.

PZT를 비롯한 일반적인 강유전체 물질의 경우 페로브스카이트 구조 내에서 (+) 전하를 띤 이온들과 (-) 전하를 띤 이온간의 상대적인 displacement에 의해 electric dipole을 형성하게 되어 분극 상태를 나타낸다. 방향이 같은 electric dipole은 domain을 형성하게 되며, 이러한 domain 들은 spin 방향이 서로 반대 방향으로 정렬된 상태가 열역학적인 자유 에너지가 가장 낮은 안정한 상태이다^[8]. 그러므로 강유전체 물질은 전계(electric field)가 가해지기 전에는 외부적으로 분극 특성을 나타내지 못한다. 전계를 가해주면 domain 내의 spin 방향이 전계의 방향에 따라 정렬하게 되며, 이러한 정렬된 상태에서는 전계를 없애주더라도 domain 간의 상호 작용에 의해 부분적으로 정렬된 상태를 유지하게 되며, 전계가 없는 상태에서도 분극 특성을 나타내게 된다. 하지만 이렇게 정렬된 상태는 열역학적으로 불안정한 상태이므로 domain 내의 spin들은 서로 반대 방향으로 정렬하려고 하며, 어느 정도의 시간이 지난 후에는 서로 반대 방향으로 정렬하는 domain 들이 늘어나게 되고 이러한 현상이 일반적인 retention failure 이다. 일반적으로 강유전체 물질에서의 분극 현상은 온도에 크게 의존한다고 보고되고 있다^[8,19]. 즉 분극 상태를 나타내는 이온들의 경우 온도가 올라갈수록 thermal vibration이 심화되어 쉽게 위치를 이동할 수 있으며, 이로 인해 고온으로 갈수록 저장된 기억 상태의 감소가 심화된다. 본 연구에서의 활성화 에너지는 분극 상태를 나타내는 domain 내의 spin들을 20% randomized

시키기 위해 필요한 에너지이다. 즉, thermal vibration에 의한 분극 상태 저하를 방해하는 barrier로 해석할 수 있다. 기존 다결정립 PZT 박막에 비해 높은 활성화 에너지를 가지는 이유는 다결정립 PZT 박막의 경우 결정립계에 산소 공공(oxygen vacancy)을 비롯한 charge를 띤 defect들이 결정립내에 비해 많이 존재하게 되고 이로 인해 고온으로 갈수록 defect의 움직임이 더 활발해지므로^[19] 분극 상태의 열화가 더 빨리 일어나는 것으로 해석할 수 있다.

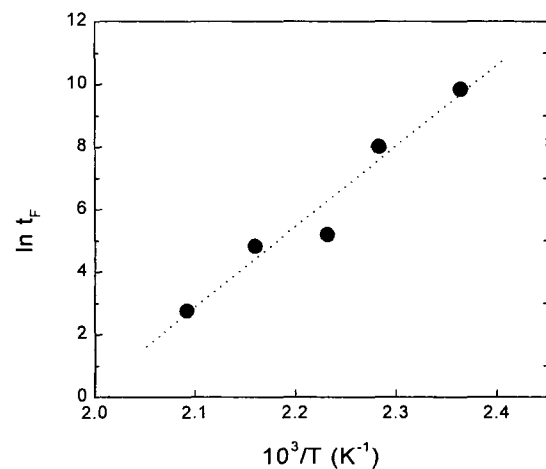


그림 7. 그림 6의 data로부터 구한 Arrhenius 그림. 각각의 온도에서의 수명을 절대온도의 역수로 나타내었다.

Fig. 7. Arrhenius plot of the failure data from Fig. 6. The life time at each temperature is plotted versus inverse absolute temperature ($1/T$).

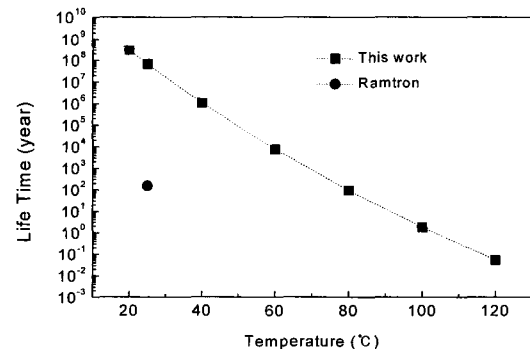


그림 8. 활성화 에너지로부터 구한 다른 온도에서의 retention 수명의 예측.

Fig. 8. Prediction of the retention performance at other temperatures calculated from the activation energy.

그림 8에는 그림 7에서 구한 활성화 에너지로부터 예측한 수명을 나타내었다. 기존에 보고된 고온에서의 retention 측정에서 구한 활성화에너지로부터 예측한 결과는 잔류분극값이 50% 감소했을 때 상온(25°C)에서의 수명이 150년이였다. 본 연구에서는 상온에서의 잔류분극값의 20% 감소했을 때 필요한 시간은 상온에서 6.6×10^7 년으로 지금까지 보고된 결과 중 가장 우수한 결과이다.

IV. 결 론

PZT seed에 의해 형성된 단결정립 PZT 박막을 이용하여 Pt/PZT/Pt 구조에서의 피로(fatigue) 및 정보 유지(data retention) 특성에 관하여 연구하였다. 피로 특성의 경우 1MHz의 주파수에서 $\pm 10V$ 의 square wave를 인가하여 측정된 결과 2×10^{11} cycle 동안 전하 특성의 변화가 관찰되지 않았으며, 정보 유지 능력의 경우 상온에서 30000초 동안 기억 상태의 변화가 없었으며, 고온에서의 retention 측정으로 계산된 활성화 에너지로부터 구한 상온에서의 20% 잔류분극값 감소를 보이는 시간은 6.6×10^7 년이였다.

참 고 문 헌

- [1] G. Groeseneken, H. E. Maes, J. Van Houdt and J. S. Witters, *Nonvolatile Semiconductor Memory Technology*, IEEE press, p. 1, 1997.
- [2] J. F. Scott and C. A. Araujo, "Ferroelectric memories", *Science*, vol. 246, pp. 1400-1405, December 1989.
- [3] J. F. Scott, L. D. McMillan and C. A. Araujo, "Ferroelectric memories : a comparison with other high-speed digital devices", *Ferroelectrics*, vol. 116, pp. 147-155, 1991.
- [4] J. Carrano, C. Sudhama, V. Chikarmane, J. Lee, Al. Tasch, W. Shepherd and N. Abt, "Electrical and reliability properties of PZT thin films for ULSI DRAM applications", *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 38, no. 6, pp. 690-703, 1991.
- [5] P. C. Fazan, "Trends in the Development of ULSI DRAM Capacitors", *Integrated Ferroelectrics*, vol. 4, pp. 247-256, 1994.
- [6] R. E. Jones, JR., P. D. Maniar, A. C. Campbell, R. Moazzami and C. J. Mogab, "High-permittivity lead based perovskite dielectrics for DRAM applications", *Integrated Ferroelectrics*, vol. 5, pp. 235-244, 1994.
- [7] S. Sinharoy, H. Buhay, D. R. Lampe, and M. H. Francombe, "Integration of Ferroelectric Thin Films into Nonvolatile Memories", *J. Vac. Sci. Tech. A*, vol. 10, no. 4, pp. 1554-1561, 1992.
- [8] L. E. Cross, *Ferroelectric Ceramics*, Birkhäuser, Basel, p. 1, 1993.
- [9] J. Chen, M. P. Harmer, and D. M. Smith, "Polarization Fatigue in Perovskite Ferroelectric Ceramics and Thin Films", in *Proc. of 4th International Symposium on Integrated Ferroelectrics*, pp. 111-115, 1992.
- [10] M. V. Raymond, J. Chen, and D. M. Smith, "Degradation of Ferroelectric Thin Films : A Defect Chemistry Approach", *Integrated Ferroelectrics*, vol. 5, pp. 73-78, 1994.
- [11] Xiaofeng Du and I-Wei Chen, "Fatigue of $Pb(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O_3$ Ferroelectric Thin Films", *J. Appl. Phys.*, vol. 83, no. 12, pp. 7789-7798, 1998.
- [12] B. M. Melnick, C. A. Paz de Araujo, L. D. McMillan, D. A. Carver and J. F. Scott, "Recent Results on Switching, Fatigue and Electrical Characterization of Sol-gel Based PZT Capacitors", *Ferroelectrics*, vol. 116, pp. 79-83, 1991.
- [13] D. M. Smyth, "Charge Motion in Ferroelectric Thin Films", *Ferroelectrics*, vol. 116, pp. 117-124, 1991.
- [14] S. B. Desu and I. K. Yoo, "Electrochemical Models of Failure in Oxide Perovskites", *Integrated Ferroelectrics*, vol. 3, pp. 365-376, 1993.
- [15] R. Waser and M. Klee, "Theory of Conduction and Breakdown in Perovskite Thin Films",

- Integrated Ferroelectrics*, vol. 2, pp. 23-40, 1992.
- [16] H. M. Duiker, P. D. Beale, J. F. Scott, C. A. Paz de Arujo, B. M. Melnick, J. D. Cuchiaro and L. D. McMillan, "Fatigue and switching in ferroelectric memories: theory and experiment", *J. Appl. Phys.*, vol. 8, no. 11, pp. 5783-5791, December 1990.
- [17] J. F. Scott, C. A. Araujo, H. Brett Meadows, L. D. McMillan and A. Shawabkeh, "Radiation effects on ferroelectric thin-film memories : retention failure mechanisms", *J. Appl. Phys.*, vol. 66, no. 3, pp. 1444-1453, August 1989.
- [18] B. P. Maderic, L. E. Sanchez and S. Y. Wu, "Ferroelectric switching, memory retention and endurance properties of very thin PZT thin films", *Ferroelectrics*, vol. 116, pp. 65-77, 1991.
- [19] In. K. Yoo, C. J. Kim and S. B. Desu, "Retentivity studies of lead zirconate titanate thin film capacitors", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol. 433, pp. 273-278, 1996.
- [20] Z. G. Zhang, Y. N. Wang, J. S. Zhu, F. Yan, X. M. Lu, H. M. Shen, and J. S. Liu, "Retention characteristics of SrBi₂Ta₂O₉ thin films prepared by metalorganic decomposition", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 73, no. 25, pp. 3674-3676, December 1998.
- [21] 이장식, "PZT 박막에서 거대 단결정립 형성을 위한 선택적 핵생성에 관한 연구", 공학석사학위 논문, 서울대학교, 1999
- [22] 이장식, 박응철, 박정호, 이병일, 주승기, "PZT seed에 의한 거대 단결정립 PZT 박막 형성에 관한 연구", 대한금속학회지, vol. 38. no.1. pp. 148-152, January 2000
- [23] S. M. Sze, *VLSI Technology*, McGraw-Hill, p. 612.
- [24] S. M. Sze, *VLSI Technology*, McGraw-Hill, p. 639.
- [25] "FM24C16-data retention characterization", *RAMTRON technology note*, August 1998.

 저 자 소 개



李章植(正會員)

1974년 6월 5일생. 1997년 서울대학교 금속공학과 졸업(공학사). 1999년 서울대학교 대학원 금속공학과(공학석사). 1999년 3월~현재 서울대학교 대학원 재료공학부 박사과정. 주관

심분야 : 강유전체 박막 형성 및 특성 평가, 강유전체 기억 소자 제조 공정 등임

朱承基(正會員) 第31卷 A編 第11號 參照