

# PZT(10/90)/PZT(90/10) 이중층 박막의 구조적, 전기적 특성

論 文

49C - 2 - 6

## Structural and Electrical Properties of PZT(10/90)/PZT(90/10) Heterolayered Thin Films

李 成 甲\* · 金 經 兌\*\* · 裴 善 基\*\*\* · 李 永 熙§

(Sung-Gap Lee · Kyoung-Tae Kim · Seon-Gi Bae · Young-Hie Lee)

**Abstract** - Ferroelectric PZT heterolayered thin films were fabricated by spin coating method on the Pt/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si substrate using PZT(10/90) and PZT(90/10) metal alkoxide solutions. All PZT heterolayered films showed a homogeneous grain structures without presence of rosette structure. It can be assumed that the lower PZT layers played a role of nucleation site for the formation of the upper PZT layer. Pb-deficient PZT phase was formed at PZT/Pt interface due to the diffusion of Pb element into a Pt bottom electrode. The relative dielectric constant and the dielectric loss of the PZT-6 film were 567 and 3.6%, respectively. Increasing the number of coatings, remanent polarization and coercive field were decreased and the values of the PZT-6 heterolayered film were 7.18  $\mu$ C/cm<sup>2</sup> and 68.5kV/cm, respectively. Leakage current densities were increased with increasing the number of coatings, and the value of the PZT-4 film was about 7x10<sup>-8</sup>A/cm<sup>2</sup> at 0.05MV/cm.

**Key Words** : PZT Heterolayered Film, Nucleation Site, Leakage Current Density, Fatigue Properties

### 1. 서 론

최근 SrTiO<sub>3</sub>, (Ba,Sr)TiO<sub>3</sub>[BST] 및 Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>[PZT]와 같은 강유전성 물질들을 비휘발성 메모리 소자 또는 DRAM 용 전하축적 물질로 응용하기 위해 많은 연구가 진행되어지고 있다. 특히 PZT계 박막은 Zr/Ti의 조성비에 따라 다양한 전기적 특성을 나타내어 초전 센서, 비선형 광학소자 및 압전 변환소자로의 응용이 가능하며, 또한 두 개의 안정한 잔류분극 상태를 가지고 있어 DRAM 및 비휘발성 메모리 소자로의 응용이 가능한 재료이다. 그러나 강유전체 박막을 반도체 메모리 소자로 응용하기 위해서는 해결해야하는 여러가지 문제점을 가지고 있으며, 그 중에서도 피로특성과 누설전류특성은 메모리 소자의 신뢰성에 큰 영향을 주는 요인으로 지적되어 오고 있다[1,2]. 최근에는 이러한 문제점을 해결하기 위해 다양한 buffer layer[3]와 전극재료[4]에 대한 연구가 진행되어 오고 있으며, 또한 BaTiO<sub>3</sub>/BaPbO<sub>3</sub>[5], PbTiO<sub>3</sub>/PbZrO<sub>3</sub>[6], Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>/(Pb,Ln)TiO<sub>3</sub>[7] 등과 같이

페로브스카이트 구조를 가지는 다른 종류의 유전체 박막들을 상호 적층시켜 제작한 박막의 전기적 특성에 관한 연구 보고가 이루어지고 있다. 또한 본 연구자들도 구조적, 전기적 특성이 서로 다른 PZT(20/80) 박막과 PZT(80/20) 박막을 상호 교대로 반복하여 적층시킨 PZT 이중층 박막을 제작하여 우수한 전기적 특성을 보고하였다[8].

본 연구에서는 솔-젤법으로 구조적, 전기적 특성이 서로 다른 정방정 구조의 PZT(10/90)과 능면체정 구조의 PZT(90/10) stock solution을 제작한 후, 서로 다른 종류의 박막을 용이하게 반복하여 적층시킬 수 있는 스�핀 코팅법을 이용하여 PZT(10/90)/PZT(90/10) 이중층 박막을 제작하였다. 제작된 박막에 있어 상부층 PZT 박막의 결정화에 대해 하부층의 PZT 박막의 역할 및 PZT 박막과 기판 그리고 PZT 박막간의 계면에서의 구조적 특성을 조사하고자 하며, 반도체 메모리 소자로의 응용 가능성을 위한 전기적특성을 조사하고자 한다.

### 2. 실 험

Pb(Zr<sub>1-x</sub>Ti<sub>x</sub>)O<sub>3</sub> (x=0.10, 0.90) 이중층 박막을 제작하기 위해 Pb-acetate trihydrate, Zr n-propoxide, Ti iso-propoxide 물질을 출발원료로 하고, 2-methoxyethanol 용액을 용매로 하여 솔-젤법으로 precursor 용액을 제조하였다. 박막의 열처리 과정 중에 발생하는 Pb의 휘발을 보상하기 위해서 10mol%의 Pb acetate를 과잉으로 첨가하였으며, 코팅용액의 최종농도는 0.33M로 조절하였다. 코팅용액의 촉매첨가, 농도조절 및 수화 과정 중에 생긴 불순물은 점적시 사용하는 주사기에 0.2

\* 正 會 員 : 西南大 電子電氣工學科 助教授 · 工博

\*\* 正 會 員 : 光云大 電子材料工學科 卒業 · 碩士

\*\*\* 正 會 員 : 市立仁川大 電氣工學科 教授 · 工博

§ 正 會 員 : 光云大 電子材料工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 10月 9日

最終完了 : 2000年 1月 9日

$\mu\text{m}$ 의 syringe filter를 장착하여 제거하였다. 먼저 정방정구조의 PZT(10/90)용액을 Pt/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si 기판위에 스핀 코팅법을 이용하여 4000rpm에서 30초 동안 코팅한 후 300°C에서 30분 동안 건조하였으며, 650°C에서 1시간 동안 소성하여 PZT-1 박막을 제작하였다. 그후, 제작된 PZT-1 박막 위에 능면체정구조의 PZT(90/10)용액을 동일한 조건으로 코팅한 후 건조와 열처리를 하였으며, 이와 같은 공정을 6번 반복하여 PZT-n(n: 코팅 횟수) 이종층 박막을 제작하였다. 제작된 PZT 이종층 박막의 상형성과 결정학적 특성을 관찰하기 위해서 X-선 회절분석(Rigaku, RTP 300RC)을 행하였으며, PZT 이종층 박막의 표면 및 단면의 미세구조는 전자현미경(JSM-6401F, JEOL Co.)을 사용하여 관찰하였다. 또한 열처리 과정에서 발생하는 PZT 박막과 기판과의 계면층에서의 미세구조의 변화를 관찰하기 위해 TEM(JEM2010, JEOL) 분석을 하였다. PZT 이종층 박막의 전기적 특성을 측정하기 위해 직경 250 $\mu\text{m}$ 의 도트 마스크를 이용하여 DC 스퍼터링 방법으로 Pt를 상부전극으로 증착하여 MFM (metal-ferroelectric-metal) 구조를 형성하였으며, 유전상수, 유전손실 및 C-V는 HP4192 Impedance analyzer를 이용하여 측정하였다. 박막의 누설전류밀도는 HP-4145B를 이용하여 측정하였으며, 잔류분극, 항전계 및 피로특성은 RT-66A를 이용하여 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

그림 1은 PZT 이종층 박막의 코팅횟수에 따른 X-선 회절분석 결과를 나타낸 것이다. 모든 박막은 pyrochlore상 및 미반응 물질이 없는 전형적인 다결정성의 PZT 결정구조를 나타내었다. PZT(10/90) 조성이 상부에 위치한 PZT-1은 전형적인 정방정구조의 X-선 회절모양을 나타내었으며, PZT(90/10)이 상부에 위치한 PZT-2의 경우 능면체정구조를 나타내었다. 그러나 PZT-3, 4, 5, 6 박막의 경우에는 박막의 코팅횟수가 증가함에 따라 (101)/(110), (112)/(211)면의 회절 피크가 증가하는 경향을 나타내었으며, 정방정구조와 능면체정구조가 혼재된 X-선 회절피크가 관찰되었다. 이는 상부의 PZT 결정성장에 대해 하부의 PZT 박막이 영향을 미쳤기 때문으로 사료된다[8].

그림 2는 PZT 이종층 박막의 표면 미세구조를 나타낸 것이며, 모든 박막에서 기공 및 rosette 구조가 없는 미세하고 치밀한 미세구조를 나타내었다. 정방정구조의 PZT(10/90) 조성이 상부에 위치한 PZT-3, 5 박막의 경우 평균 결정립의 크기는 약 50-80nm이었으며, 박막의 코팅횟수가 증가함에 따라 평균 결정립의 크기는 감소하며, 더욱 치밀한 결정립 구조를 나타내었다. 능면체정구조를 가지는 PZT(90/10) 조성이 상부에 위치한 PZT-4, 6 박막의 경우에는 기공 및 rosette 구조가 없는 치밀한 미세구조를 나타내었다. 일반적으로 Zr-rich 조성의 PZT 박막을 솔-겔법으로 제작할 경우 다결정구조의 강유전상인 rosette 구조가 관찰되어 진다[9]. 그러나 본 연구의 PZT 이종층 박막에서는 이러한 rosette 구조는 관찰되지 않았으며, 이는 정방정구조의 PZT(10/90) 박막 위에 능면체정구조의 PZT(90/10) 박막을 코팅하는 경우 하부층의 미세 결정립이 상부층의 결정화에 있어 nucleation site로 작용하였기 때문으로 사료된다.

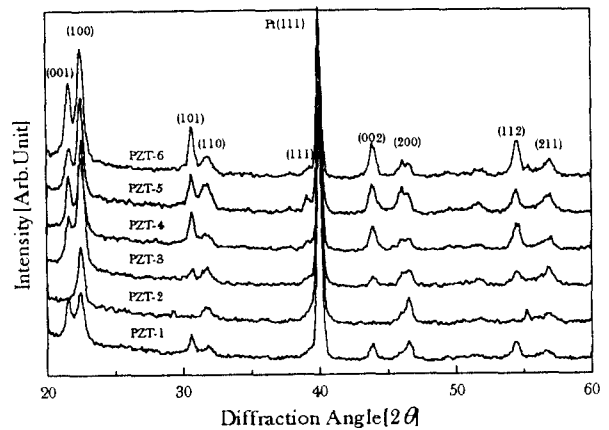


그림 1 PZT 이종층 박막의 X-선 회절분석  
Fig. 1 XRD analysis of PZT heterolayered thin films

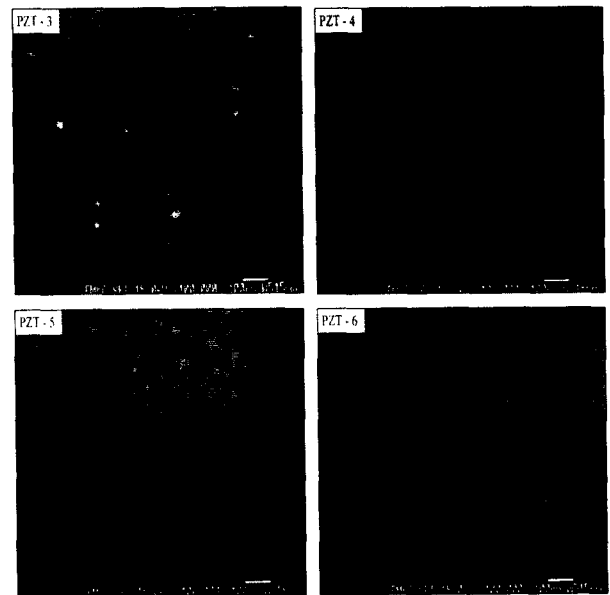


그림 2 PZT 이종층 박막의 표면 미세구조  
Fig. 2 Surface SEM photographs of PZT heterolayered thin films

그림 3은 PZT 이종층 박막의 단면 미세구조를 나타낸 것이다. 1회 코팅과 열처리를 행한 박막의 평균 두께는 약 30-40nm이었으며, 각 박막의 결정립 모양은 과립상의 구조를 나타내었다. 코팅 횟수가 증가함에 따라 PZT/Pt, Pt/Ti 계면은 거친 구조를 나타내었으며, 이는 박막의 코팅 횟수 증가, 즉 박막의 열처리 공정이 증가함에 따라 PZT 박막의 Pb 원소가 하부전극으로의 확산과 Ti층의 산화에 기인한 것으로 사료된다[10].

그림 4는 PZT 박막과 Pt 하부전극 사이의 계면구조를 자세히 관찰하기 위한 PZT-6 박막의 TEM 분석결과이다. 계면층은 PZT 박막보다 밝은 상을 가지며, 약 5nm의 두께를 가지고 연속적으로 분포하고 있다. 이러한 계면층은 열처리

과정 중 PZT 박막의 Pb 원소가 Pt층으로 확산함에 의한 것이며, 일반적으로 Pb 원소가 결합된  $Pb(Zr,Ti)_3O_7$ 의 조성을 갖는 것으로 보고되고 있다[11]. 그리고 PZT/Pt 계면에는 직경 3-8nm의 크기를 가지며, 어두운 상으로 나타난 많은

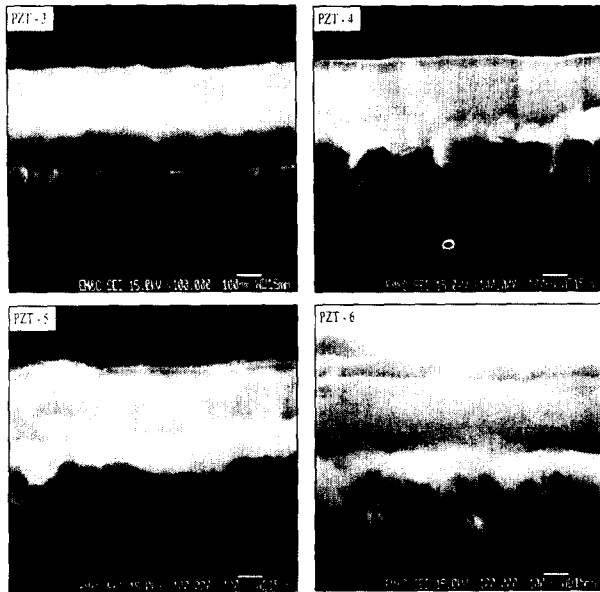


그림 3 PZT 이종층 박막의 단면 미세구조  
Fig. 3 Cross-section SEM photographs of PZT hetero-layered thin films

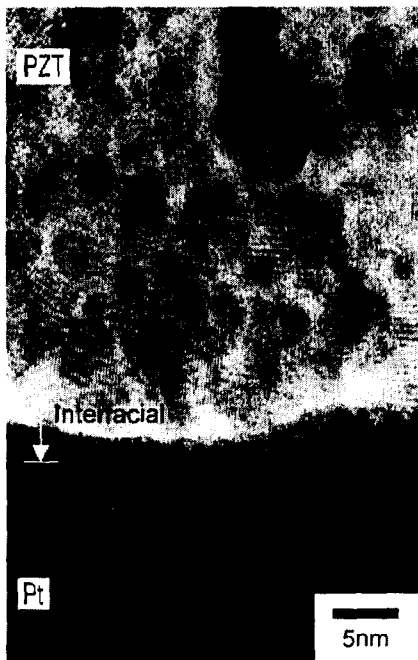


그림 4 PZT-6 박막의 TEM 계면분석  
Fig. 4 TEM interface analysis of PZT hetero-layered thin films

수의 결정립이 관찰되었다. 이상의 결과로부터 PZT/Pt 계면층은 페로브스카이트상의 미세 결정립이 Pb 결정립의 pyrochlore matrix상에 불연속적으로 분포하고 있는 것으로 사료된다.

그림 5는 PZT 이종층 박막의 코팅횟수에 따른 유전상수 및 유전손실 특성을 나타낸 것이다. 유전상수는 코팅횟수에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, 단일조성의 PZT (10/90) 박막(K=320)과 PZT(90/10) 박막(K=250)에 비해 우수한 높은 유전상수 특성을 나타내었다[12]. 이는 PZT 이종층 박막의 결정 성장시 하부층 PZT 박막이 상부층 PZT 박막의 핵 생성 사이트로 작용함에 따라 pyrochlore상이 없는 균질하고 치밀한 결정구조를 형성하기 때문으로 사료된다.

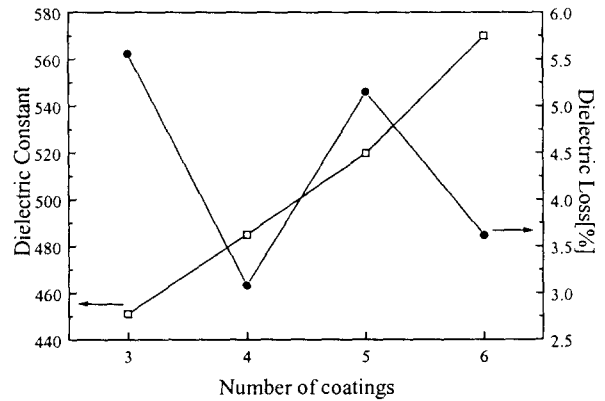


그림 5 PZT 이종층 박막의 코팅횟수에 따른 유전상수 및 유전손실[1kHz]  
Fig. 5 Dielectric constant and dielectric loss of PZT hetero-layered thin films as a function of the number of coatings[1kHz]

그림 6은 PZT 이종층 박막의 코팅횟수에 따른 잔류분극 및 항전계의 변화를 나타낸 것이며, 코팅횟수가 증가할수록 잔류분극과 항전계는 감소하는 경향을 나타내었다. 박막의 코팅횟수 증가에 따른 잔류분극의 감소는 PZT/PZT 및 PZT/Pt 계면에 존재하는 결함 및 이차상 등에 의한 공간전하가 결정입계 또는 박막간의 계면에 분포하여 내부 전기장의 증가 및 분극의 이동을 방해하기 때문으로 사료된다. 또한 코팅횟수에 따른 항전계의 감소는 박막의 두께가 증가함에 따른 분극의 회전을 억제시키는 Pt 하부 전극과 박막사이의 응력이 상대적으로 감소하였기 때문으로 사료된다. PZT-6 박막의 잔류분극 및 항전계는 각각  $7.18\mu C/cm^2$ ,  $68.5kV/cm$ 의 특성을 나타내었다.

그림 7은 PZT 이종층 박막의 코팅 횟수에 따른 C-V특성을 나타낸 것이다. 모든 PZT 이종층 박막에서 유전상수는 인가전압에 따라 이력특성을 나타내는 전형적인 비선형 유전체의 특성을 나타내었으며, 전압인가에 따른 유전상수의 급격한 감소는 PZT 이종층 박막에서의 PZT/PZT, PZT/전극의 계면에서 유기되는 공간전하분극 및 계면분극의 억제에 기인한 것으로 사료된다. 또한 PZT 이종층 박막의 C-V 곡선은 인가 전압에 대해 왼쪽으로 이동된 비대칭성을 나타

내고 있으며, 이는 박막 제조시 상부전극과 하부전극의 열처리 공정의 차이에 의해 PZT 박막과 전극의 계면에 분포하는 공간전하에 의한 내부 바이어스의 영향으로 사료된다.

그림 8은 인가전압에 따른 PZT 이종층 박막의 누설전류 밀도를 나타낸 것이다. 인가 전계가 약 0.08MV/cm 이하의 영역에서는 누설전류와 전압의 관계가  $J \propto V$ 인 ohmic 전도 특성을 나타내었으며, 이상에서는  $J \propto V^2$ 의 공간전하 제한전류에 의한 전도기구 특성을 나타내었다. 박막의 코팅횟수가 증가함에 따라 누설전류밀도는 증가하는 경향을 나타내었으며, 이는 열처리 공정이 증가함에 따라 PZT 박막과 기판의 계면에서의 원자 확산 및 이에 따른 결함의 증가에 기인한 것으로 사료된다. PZT-4 박막의 경우 0.08MV/cm에서  $10^{-7} A/cm^2$  이하의 낮은 누설전류 밀도를 나타내었다.

피로특성은 강유전성 물질에 교류전계를 인가함에 따라 분극 반전에 따른 시편 내부의 자발분극의 감소를 의미한다. 본 연구에서는 펄스의 폭이  $33 \mu sec$ 인  $\pm 10V$ 의 bipolar square pulse를  $10^9$ 회까지 인가하여 피로특성을 측정하였으

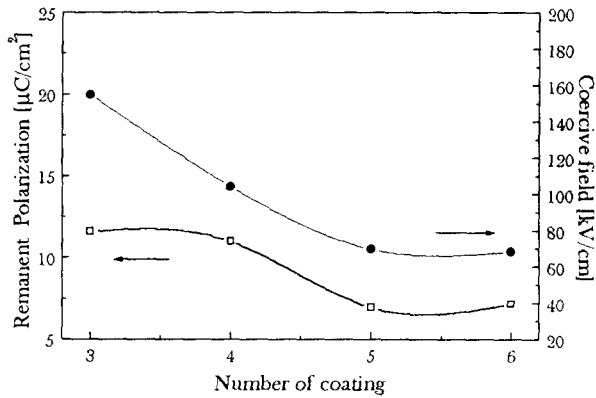


그림 6 PZT 이종층 박막의 코팅횟수에 따른 잔류분극 및 항전계

Fig. 6 Remnant polarization and coercive field of PZT heterolayered thin films as a function of the number of coatings

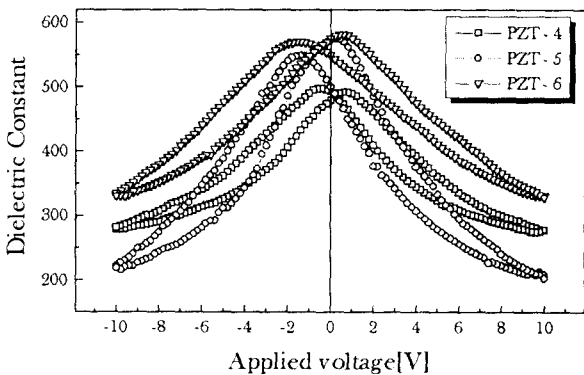


그림 7 PZT 이종층 박막의 C-V특성

Fig. 7 C-V characteristics of PZT heterolayered thin films

며, 그림 9는 PZT 이종층 박막의 펄스 주기에 따른 잔류분극의 변화를 나타낸 것이다. PZT-4, 5 박막의 경우  $10^8$ 의 주기까지는 비교적 안정한 잔류분극 특성을 나타내었으며, 그 이상에서는 감소하는 경향을 나타내었다. PZT-6 박막의 경우 잔류분극은 약  $10^8$ 의 분극반전 주기에서 최대로 증가한 후 급격히 감소하는 경향을 나타내었으며, 이는 반복된 열처리 공정에 의해 PZT/Pt 계면에 형성된 상유전상에 의한 도메인의 pinning 현상이 증가하였기 때문으로 사료된다 [13].

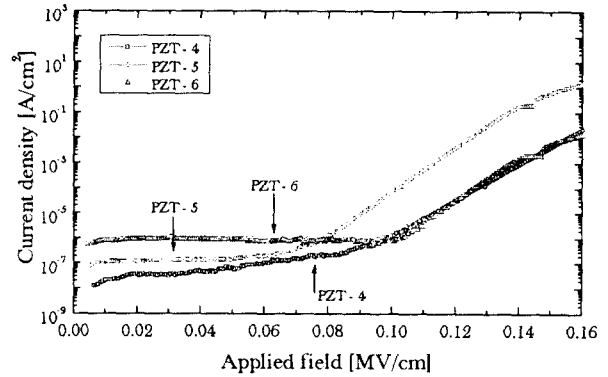


그림 8 인가전압에 따른 PZT 이종층 박막의 누설전류 밀도  
Fig. 8 Leakage current characteristics with an applied voltage of PZT heterolayered thin films

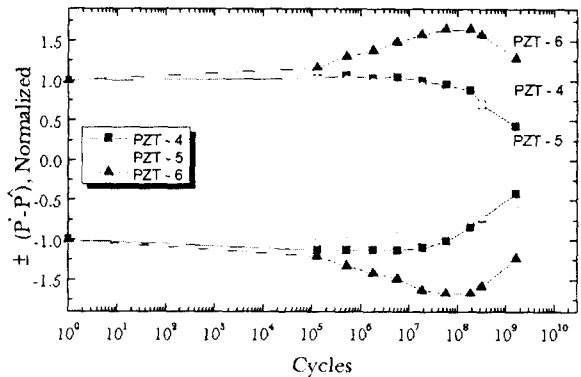


그림 9 PZT 이종층 박막의 잔류분극의 피로 특성

Fig. 9 Fatigue characteristics of remnant polarization of PZT heterolayered thin films

#### 4. 결 론

본 연구에서는 솔-젤법으로 제조한 PZT(10/90), PZT(90/10) 조성의 stock solution을 이용하여 Pt/Ti/SiO<sub>2</sub>/Si 기판에 스펀 코팅법으로 PZT 이종층 박막을 제작하였다. X-선 회절분석 결과, 미반응 물질과 이차상 등은 관찰되지 않았으며, 상부층 PZT 박막의 결정 성장시 하부층의 PZT 박막은 nucleation site로 작용한 것으로 사료된다. PZT/Pt 계면은 열처리 과정에서 PZT 박막의 Pb 원소가 하부전극으로 확산함에 의해 약  $5 \mu m$ 의 두께를 갖

는 Pb 원소가 결핍된 PZT 계면층이 분포하고 있는 것으로 관찰되었다. 코팅횟수가 증가함에 따라 유전상수는 증가하는 경향을 나타내었으며, PZT-6 박막의 경우 유전상수와 유전손실은 각각 567과 3.6%의 특성을 나타내었다. 잔류분극과 항전계는 코팅횟수에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, PZT-6 박막에서 각각  $7.18 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ,  $68.5\text{kV}/\text{cm}$ 의 특성을 나타내었다. 누설전류 밀도는 박막의 코팅횟수에 따라 증가하는 경향을 나타내었으며, PZT-4 박막의 경우  $0.05\text{MV}/\text{cm}$ 에서  $7 \times 10^{-8} \text{A}/\text{cm}^2$ 의 양호한 특성을 나타내었다. 분극반전 주기에 따른 잔류분극의 변화는 PZT-4, 5 박막에서  $\pm 10\text{V}$ 의 bipolar square pulse를  $10^8$ 회까지 인가한 경우 안정한 피로특성을 나타내었으며, 그 이상에서는 감소하는 경향을 나타내었다.

참 고 문 헌

[1] H. N. Al-Shareef, B. A. Tuttle, W. L. Warren, T. J. Headley, D. Dimos, J. A. Voigt and R. D. Nasby, "Effect of B-site cation stoichiometry on electrical fatigue of  $\text{RuO}_2/\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3/\text{RuO}_2$  capacitors", J. Appl. Phys. Vol.79, No.2, pp.1013-1016, 1996

[2] S. O. Park, C. S. Hwang, H. J. Cho, C. S. Kang, H. K. Kang, S. I. Lee and M. Y. Lee, "Fabrication and Electrical Characterization of  $\text{Pt}/(\text{Ba},\text{Sr})\text{TiO}_3/\text{Pt}$  Capacitors for Ultralarge-Scale Integrated Dynamics Random Access Memory Applications", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.35, pp.1548-1552, 1996

[3] H. Doi and T. Atsuki, "Influence of Buffer Layers and Excess Pb/Zr+Ti Ratios on Fatigue Characteristics of Sol-Gel Derived  $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$  Thin Films", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.34, pp.5105-5112, 1995

[4] K. Aoki, Y. Fukuda, K. Numata and A. Nishimura, "Electrode Dependences of Switching Endurance Properties of Lead-Zirconate-Titanate Thin Film Capacitors", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.35, pp.2210-2215, 1996

[5] T. Azuma, S. Takahashi and M. Kuwabara, "Preparation and Basic Properties of  $\text{BaTiO}_3$ - $\text{BaPbO}_3$  Multilayer Thin Films by Metal-Alkoxides Method", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.32, pp.4089-4091, 1993

[6] Y. Ohya, T. Ito and Y. Takahashi, "Dielectric Properties of Multilayered Ferroelectric Thin Films Fabricated by Sol-Gel Method", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.33, pp.5272-5276, 1994

[7] I. Kanno, S. Hayashi, T. Kamade, M. Kitagawa and T. Hirao, "Low-Temperature Preparation of  $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$  Thin Films on  $(\text{Pb},\text{La})\text{TiO}_3$  Buffer Layer by Multi-Ion-Beam Sputtering", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.32, pp.4057-4060, 1993

[8] S. G. Lee, I. G. Park, S. G. Bae and Y. H. Lee, "Dielectric Properties of  $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$  Heterolayered Films Prepared by Sol-Gel Method", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.36, pp.6880-6883, 1997

[9] A. H. Carim et al., "Microstructural of Solution-Processed Lead Zirconate Titanate Thin Film", J. Am. Ceram. Soc. Vol.51. pp.1455-1458, 1991

[10] S. O. Chung, J. W. Kim, G. H. Kim, and W. J. Lee, "Formation of Lead Zirconate Titanate/Pt Interfacial Layer and Structural Changes in the  $\text{Pt}/\text{Ti}/\text{SiO}_2/\text{Si}$  Substrate during the Deposition of PZT Thin Film by Electron Cyclotron Resonance Plasma Enhanced

Chemical Vapor Deposition", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.36, pp.4386-4391, 1997

[11] K. Kugimuya, I. Ueda and K. Iizima, "Characterization of Thin PZT Films on Platinum Films", Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.243, pp.179-184, 1992

[12] H. Watanabe and T. Mihara, "Device effects of various Zr/Ti ratios of PZT thin films prepared by sol-gel method", Integrated Ferroelectrics, Vol.1. pp.293-304, 1992

[13] W. L. Warren, D. Dimos, B. A. Tuttle, G. E. Pike and H. N. Al-Shareef, "Relationships Among Ferroelectrics Fatigue, Electronic Charge Trapping, Defect-Dipoles, and Oxygen Vacancies in Perovskite Oxides", Integrated Ferroelectrics, Vol.16, pp.77-86, 1997

저 자 소 개



이 성 갑 (李成甲)

1963년 5월 1일생. 1985 광운대 공대 전자 재료공학과 졸업. 1987년 광운대 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 1991년 광운대 대학원 전자재료공학과 졸업(공학). 현재 서남대학교 전기전자공학부 조교수

Tel : 0671-620-5246, Fax : 0671-33-9306

E-mail : isgap@tiger.seonam.ac.kr



김 경 태 (金徑兌)

1970년 12월 27일생. 1997년 서남대 전자 공학과 졸업. 1999년 광운대 대학원 전자 재료공학과 졸업(석사).

Tel : 02-812-9681

E-mail : kkt5648@hanmail.net



배 선 기 (裵善基)

1950년 4월 9일생. 1976년 숭실대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 연세대 산업대학원 졸업(석사). 1989년 광운대 대학원 전자재료공학과 졸업(공학). 현재 시립인천대 공대 전기공학과 교수

Tel : (032) 770-8432

E-mail : sgbae@lionr.inchon.ac.kr



이 영 희 (李永熙)

1973년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1985~1986년 Penn. State MRL 객원 연구원. 현재 광운대 공대 전자재료공학과 교수.

Tel : 02-940-5164, Fax : 02-915-8084

E-mail : yhlee@daisy.kwangwoon.ac.kr