

Sol-Gel법으로 제작한 PZT(30/70)/PZT(70/30) 이중층 박막의 구조 및 유전 특성

論 文
48C - 7 - 3

Structural and Dielectrical Properties of PZT(30/70)/PZT(70/30) Heterolayered Thin Film Prepared by Sol-Gel Method

金景均* · 鄭長鎬** · 李成甲*** · 李永熙[§]
(Kyoung-Gyun Kim · Jang-Ho Chung · Sung-Gap Lee · Young-Hie Lee)

Abstract - Ferroelectric PZT(30/70)/PZT(70/30) heterolayered thin films were fabricated by spin-coating method on the Pt/Ti/SiO₂/Si substrate alternately using PZT(30/70) and PZT(70/30) alkoxide solutions prepared by sol-gel method. The coating and heating procedure was repeated six times to form PZT heterolayered films, and thickness of the film obtained by one-times drying/sintering process was about 40-50 nm. All PZT heterolayered films showed dense and homogeneous structure without the presence of rosette structure. The relative dielectric constant, remanent polarization and leakage current density of PZT heterolayered films were superior to those of single composition PZT(30/70) and PZT(70/30) films, and those values for the PZT-6 film were 975, 21 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ and $8 \times 10^{-9} \text{ A}/\text{cm}^2$, respectively. And the PZT-6 heterolayered film showed fairly good fatigue characteristics of remanent polarization and coercive field after application of 10^8 switching cycles.

Key Words : PZT heterolayered film, sol-gel method, Dielectric properties, Leakage current

1. 서 론

강유전체 BaTiO₃(BT), PbTiO₃(PT), Pb(Zr,Ti)O₃(PZT) 및 (Pb,La)(Ti,Zr)O₃(PLZT)계 세라믹은 그들의 조성비에 따른 다양한 전기적 특성에 의해 유전체 재료, 전기 광학용 재료, 압전 변환기 및 여러가지의 센서 재료로서 이용 가능한 물질이다. 최근들어 스퍼터링, metalorganic chemical vapor deposition(MOCVD), pulsed laser ablation(PLA) 및 솔-젤법 등과 같은 유전체 재료의 박막 제조기술이 발달함에 따라 이를 이용한 미소 변위 제어소자, 초전형 적외선 센서 및 반도체 기억소자의 커패시터 재료로서의 응용을 위해 많은 연구가 진행되고 있다[1-4]. 특히 PZT 박막은 높은 유전상수와 잔류분극 특성을 이용한 비휘발성 dynamic random access memory(DRAM) 소자와 ferroelectric RAM(FRAM) 소자의 전하 축적물질로 실용화하기 위해 박막의 제조방법 및 재료의 물성에 대한 연구와 함께 buffer layer의 영향[5] 및 다양한 전극재료의 효과[6,7]에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 PZT 박막은 연속적인 분극반전에 의해 잔류분극이 크게 감소하여 피로특성이 좋지 않은 단점을 가지고 있어 전하 축적물질로의 응용에 제한을 받고 있다[8]. 이러한

문제점을 해결하기 위해 다양한 전극재료에 대한 영향, 박막 제조시 seeding layer의 역할[9] 및 서로 다른 재료를 상호 반복시켜 제작한 다층구조의 박막에 대한 연구[10,11]가 진행되고 있다. 본 연구자도 서로 다른 조성의 PZT 박막을 상호 반복시켜 제작한 이중층 구조의 PZT 박막에서 우수한 전기적 특성을 관찰하였다[12].

따라서 본 연구에서는 제조단가가 저렴하고, 화학양론적 조성의 제어가 용이하고, 대면적화가 가능한 솔-젤법을 이용하여 PZT(30/70)과 PZT(70/30) 알콕사이드 용액을 제조한 후, Pt/Ti/SiO₂/Si 기판위에 스핀 코팅법을 이용하여 PZT 이중층 박막을 제작하고자 하며, 시편 소결시 하부층의 역할이 박막의 구조적, 전기적 특성에 미치는 영향에 대한 고찰과 이중층 박막의 유전적 특성을 측정하여 기억소자의 전하 축적 물질로의 응용 가능성에 대해 고찰하고자 한다.

2. 실험

Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃ (x=0.30, 0.70) 코팅 용액은 출발원료로 Pb acetate trihydrate [Pb(CH₃CO₂)₂ · 3H₂O], Zr n-propoxide [Zr(OCH₂CH₂CH₃)₄], Ti iso-propoxide {Ti[OCH(CH₃)₂]₄}를 사용하였으며, 용매로는 2-methoxyethanol (CH₃OCH₂CH₂·OH)를 사용하여 일반적인 솔-젤법을 이용하여 제조하였다. 기판은 Pt(150nm)/Ti(100nm)/SiO₂(100nm)/p-Si(100)을 사용하였다. 그림 1의 제작공정에 따라 먼저 PZT(30/70) 조성의 코팅 용액을 Pt 기판 상에 4000 rpm으로 30초 동안 스핀 코팅한 후, 유기물을 제거하기 위해 핫-플레이트를 사용하여 300°C에서 30분간 건조하였으며, 페로브스카이트상으로서의 결정화를 위해 650°C에서 1시간 동안 소결하였다. 이와 같이

* 準 會 員 : 光云大 電子材料工學科 碩士課程
** 正 會 員 : 光云大 電子材料工學科 研究員 · 工博
*** 正 會 員 : 西南大 電子電氣工學部 助教授 · 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 3月 4日
最終完了 : 1999年 6月 2日

제작된 첫 번째층 PZT(30/70) 박막(PZT-1)위에 PZT(70/30) 코팅용액을 동일한 제조조건으로 스핀 코팅 및 건조와 소결을 하여 두 번째층(PZT-2)을 제작하였으며, 이러한 과정을 총 6회 반복하여 PZT-n(n:코팅 횟수) 이중층 박막을 제작하였다. 제작된 PZT 이중층 박막의 결정구조를 관찰하기 위해 X-선 회절분석(XRD:RTP 300RC X-ray generator, RIGAKU)을 하였으며, 표면과 단면의 미세구조를 관찰하기 위해 전자현미경(SEM: JSM-6320F, JEOL)을 이용하여 관찰하였다. 전기적특성 측정을 위해 PZT 이중층 박막 위에 스퍼터링법으로 직경 250 μm 의 Pt 전극을 상부전극으로 제작하였으며, 유전상수와 유전손실은 LCR 메타(AG-4311B, ANDO)를 이용하여, 잔류분극 및 항전계 특성은 RT-66A(Radiant Technologies, USA)를 이용하여 측정하였다.

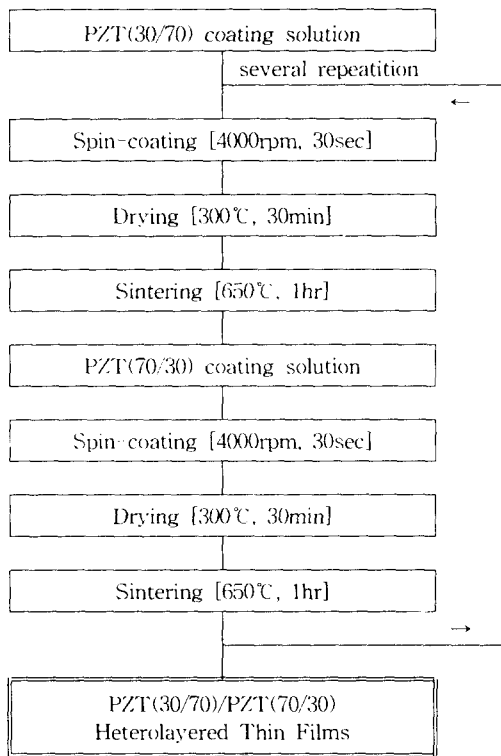


그림 1. PZT(30/70)/PZT(70/30) 이중층 박막의 제작 공정도
 Fig. 1. PZT(30/70)/PZT(70/30) heterolayered thin films fabrication process

3. 결과 및 고찰

그림 2는 PZT 이중층 박막의 코팅횟수에 따른 표면의 미세구조를 나타낸 것이다. 정방정구조의 PZT(30/70) 박막이 상부층으로 위치한 (a) PZT-3, (c) PZT-5 박막의 경우 약 0.1 μm 이하의 미세한 결정립이 관찰되었으며, 능면체구조의 PZT(70/30)박막이 상부층으로 위치한 (b) PZT-4, (d) PZT-6 박막의 경우 이차상 및 rosette 구조가 없는 매우 균일한 미세구조를 나타내었다. 일반적으로 솔-겔법을 이용하여 PZT 박막을 제작하는 경우 Zr-rich 조성의 PZT 박막에서는 rosette 구조가 관찰되며, 이는 Zr의 조성비가 증가할수록 페

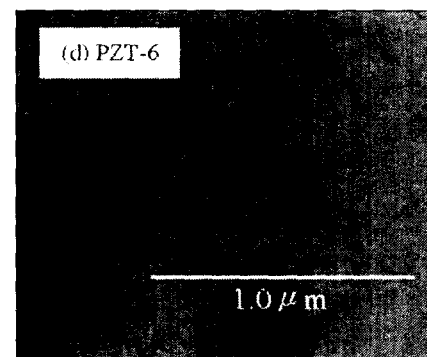
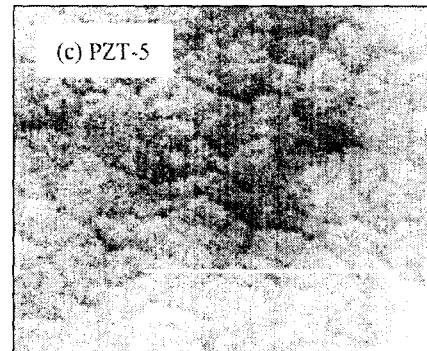
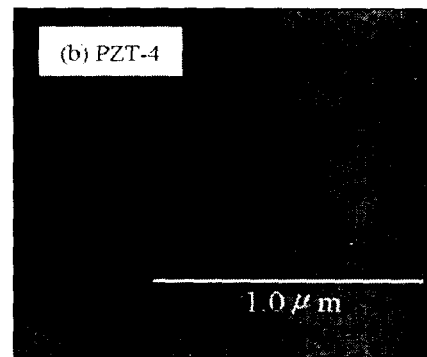
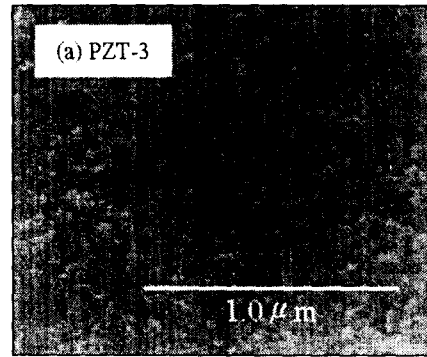


그림 2 PZT 이중층 박막의 표면사진
 Fig. 2 Surface SEM micrographs of PZT heterolayered films

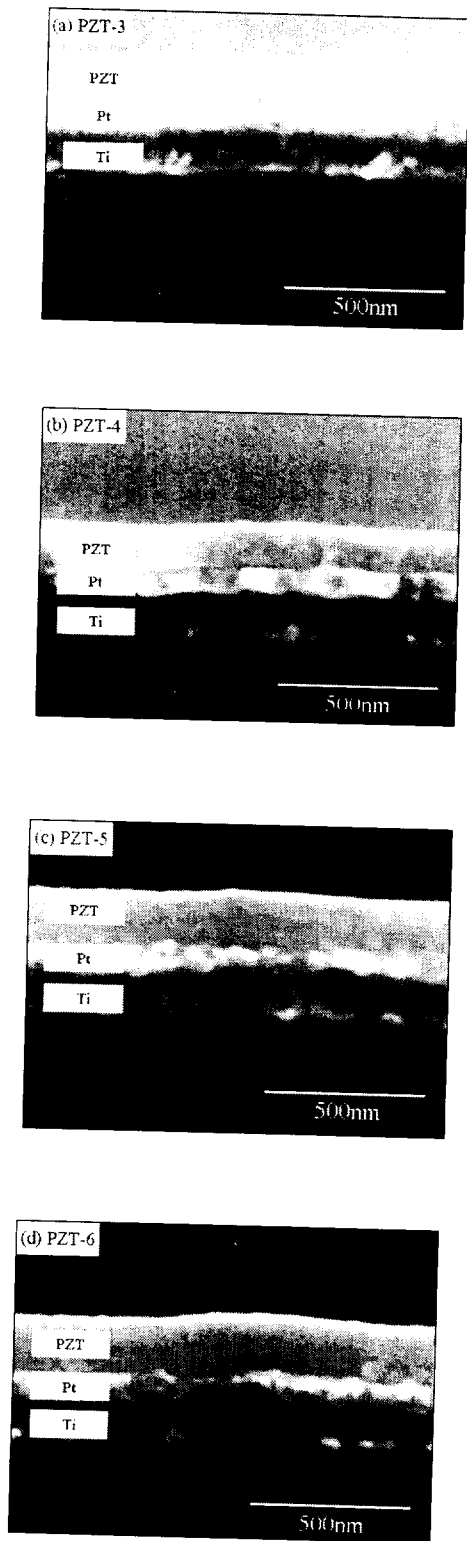
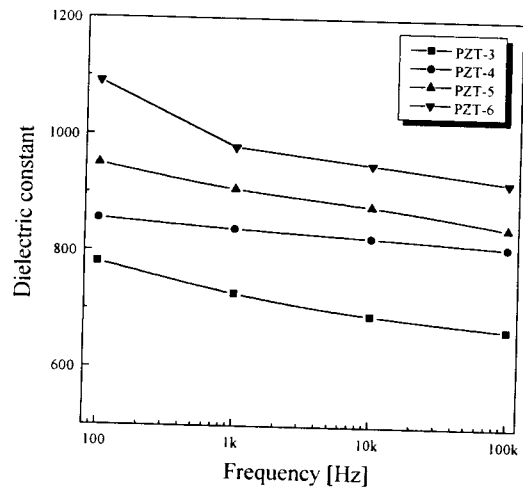


그림 3 PZT 이중층 박막의 단면사진
Fig. 3 Cross-sectional SEM micrographs of PZT heterolayered films

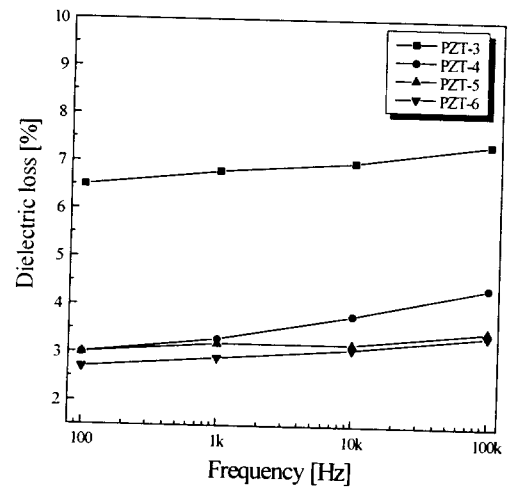
로브스카이트 PZT 박막의 핵 형성을 위한 활성화 에너지가 증가하기 때문이다[13,14]. 그러나 본 연구에서 제작한 PZT

이중층 박막의 경우 이러한 rosette 구조는 관찰되지 않았으며, 이는 시편 소결시 하부의 정방정구조의 PZT 박막이 상부의 능면체정구조의 PZT 박막에 대해 페로브스카이트상 형성을 위한 nucleation site로 작용함에 따른 결과로 사료된다.

그림 3은 PZT 이중층 박막의 코팅 횟수에 따른 파단면을 나타낸 것이다. 1회의 코팅 및 열처리를 행한 박막의 평균 두께는 약 40-50nm이었으며, 모든 박막은 균일한 표면구조를 나타내었다. 본 연구에서 제작한 PZT(30/70)/PZT(70/30) 이중층 박막의 경우 코팅횟수에 따른 박막의 각 계면은 구별할 수 없었으며, 이는 박막 열처리시 각 계면에서의 Pb 원자의 확산에 의한 것으로 사료된다. 그러나 이러한 결과는 본 연구자들이 앞서 연구한 PZT(20/80)/PZT(80/20) 이중층 박막의 경우 각 계면이 명확하게 구별되어 지는 것과는 다른 결과를 나타내는 것이며, 현재 이에 대한 원인 및 현상을 규명하기 위한 연구가 진행되어지고 있다.



(a) 유전상수



(b) 유전손실

그림 4 PZT 이중층 박막의 인가 주파수에 따른

(a) 유전상수 및 (b) 유전손실

Fig. 4 (a) Dielectric constant and (b) dielectric loss of PZT heterolayered films as a function of applied frequency

그림 4는 PZT 이종층 박막의 코팅 횟수 및 인가 주파수에 따른 유전상수와 유전손실을 나타낸 것이다. PZT 이종층 박막의 코팅 횟수가 증가함에 따라 유전상수는 증가하는 경향을, 유전손실은 감소하는 경향을 나타내었으며, PZT-6 박막의 경우 1kHz에서 각각 975와 2.8%의 우수한 특성을 나타내었다. 본 연구에서 제작한 PZT(30/70)/PZT(70/30) 이종층 박막은 단일 조성의 PZT(30/70) 박막과 PZT(70/30) 박막의 유전상수에 비해 우수한 특성을 나타내었으며, 이는 PZT 이종층 박막 제조시 하부층이 상부층에 대한 nucleation site로 작용함에 따른 rosette 구조가 없는 균일한 강유전성 결정립의 형성 및 PZT(30/70) 박막과 PZT(70/30) 박막의 계면에서 분극효율의 증가에 기인한 것으로 사료된다[15].

그림 5는 PZT 이종층 박막의 코팅 횟수에 따른 잔류분극 및 항전계 특성을 나타낸 것이다. PZT 이종층 박막의 코팅 횟수가 증가함에 따라 잔류분극은 증가하는 경향을, 항전계는 감소하는 경향을 나타내었으며, 단일 조성의 PZT(30/70) 박막의 $1.3 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $31\text{kV}/\text{cm}$ 와 PZT(70/30) 박막의 $4.1 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $50\text{kV}/\text{cm}$ 와 비교하여[16], PZT-6 박막의 경우 각각 $21 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, $67\text{kV}/\text{cm}$ 의 우수한 특성을 나타내었다. 이는 PZT 이종층 박막의 코팅 횟수가 증가함에 따라 분극효율의 증대 및 박막과 기판 사이에 유기된 응력이 상대적으로 감소하기 때문으로 사료된다.

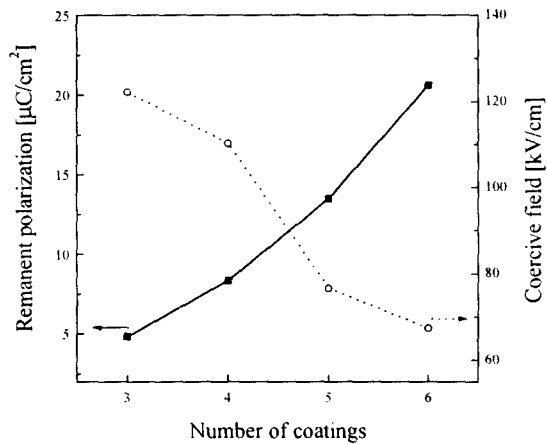
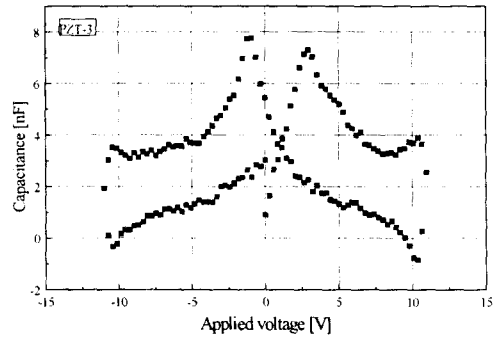


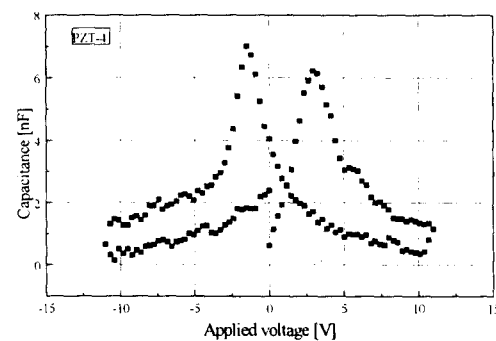
그림 5 PZT 이종층 박막의 코팅 횟수에 따른 잔류분극 및 항전계

Fig. 5 Remanent polarization and coercive field of PZT heterolayered films as a function of the number of coatings

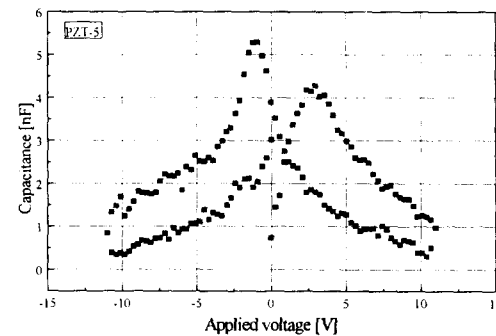
그림 6은 PZT 이종층 박막의 인가 전압에 따른 C-V 특성을 나타낸 것이다. 정전용량은 PZT 이종층 박막의 강유전성에 기인하여 인가 전압의 극성에 의존하는 이력특성을 나타내었다. 그러나 이력곡선의 중심은 인가전압이 0 V일 때 위치하지 않고 (+)전압 방향으로 이동하여 위치하였으며, 이는



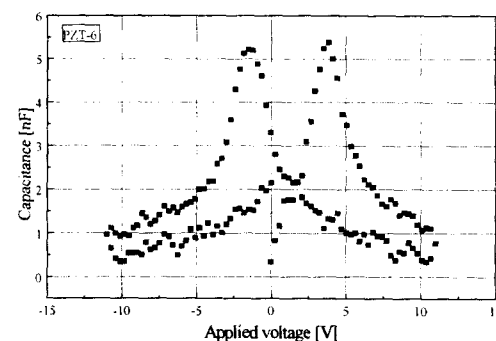
(a) PZT-3



(b) PZT-4



(c) PZT-5

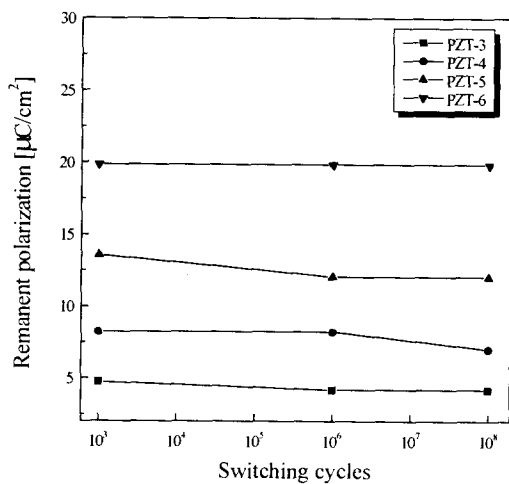


(d) PZT-6

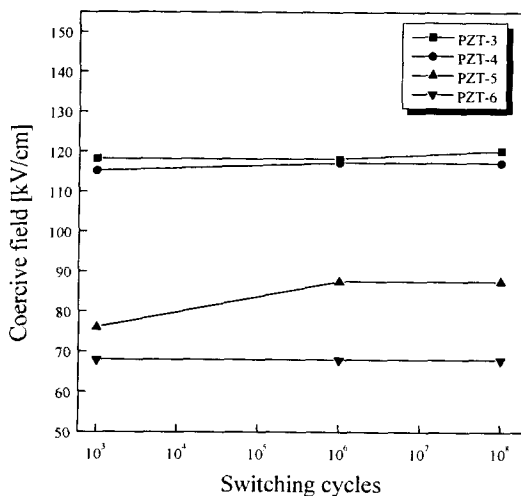
그림 6 PZT 이종층 박막의 인가 전압에 따른 C-V 특성
Fig. 6 C-V characteristics of PZT heterolayered films

박막 제조시 하부전극에 대해 소결온도가 인가됨에 따라 PZT 박막의 Pb 원소가 하부전극으로 확산함에 따른 공간전하층의 형성에 기인한 것으로 사료된다. 스위칭 전압은 박막의 코팅 횟수에 대해 약간 증가하는 경향을 나타내었으며, 상부전극에 (+)와 (-) 극성의 전압을 인가할 경우 각각 +3V ~ +5V와 -1V ~ -2V의 특성을 나타내었다.

그림 7은 PZT 이종층 박막의 ±10V의 구형파 펄스 인가에 따른 잔류분극 및 항전계의 피로특성을 나타낸 것이다. 분극 스위칭 주기의 증가에 따라 잔류분극은 약간 감소하는 경향을, 항전계는 약간 증가하는 경향을 나타내었으며, 특히 PZT-6 박막의 경우 10⁸의 펄스 인가 후에도 잔류분극 및 항전계는 거의 변화하지 않는 매우 우수한 피로특성을 나타내



(a) 잔류분극



(b) 항전계

그림 7 PZT 이종층 박막의 (a) 잔류분극 및 (b) 항전계에 대한 피로특성

Fig. 7 Fatigue characteristics of (a) remanent polarization and (b) coercive field for PZT heterolayered films

었다. 일반적으로 반복된 스위칭에 기인하여 형성된 Pb 공격자와 산소공격자는 자신의 낮은 포텐셜 에너지에 의해 전극/박막의 계면, 박막/박막의 계면 또는 결정 입계층에 존재하며, 피로의 원인이 된다[17]. 따라서 본 연구에서 제작한 PZT 이종층 박막의 경우 분극 스위칭에 의해 형성된 Pb 공격자와 산소공격자 등이 PZT 박막의 계면에 포획됨에 기인하여 우수한 피로특성을 나타낸 것으로 사료되며, 향후 강유전체 박막의 피로특성에 대한 문제는 이와 같은 이종층 구조를 사용함으로써 해결할 수 있을 것으로 사료된다.

그림 8은 PZT 이종층 박막의 분극 스위칭 전류곡선을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 PZT 이종층 박막과 100Ω의 저항을 직렬로 연결시킨 modified Sawyer-Tower 회로에 ±10V, 60Hz의 bipolar 펄스 전압을 인가하여 분극 반전에 의한 전류를 측정하였으며, 이때 최대 분극전류가 1/10로 감소하는데 걸리는 시간을 분극 스위칭 시간으로 하였다. 분극 스위칭 시간은 박막의 코팅 횟수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었으며, PZT-6 박막의 경우 ±10 V의 인가전압에 대해 0.13 μsec의 양호한 특성을 나타내었다. 이러한 특성은 rosette 구조가 없는 미세하고 균일한 결정립 구조와 박막과 전극사이의 계면에 형성된 응력의 감소에 기인한 것으로 사료된다.

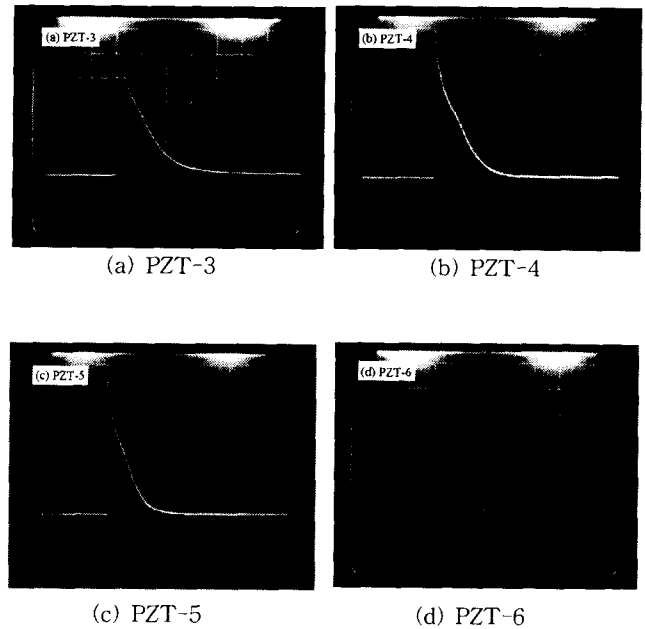


그림 8. PZT 이종층 박막의 분극 스위칭 전류곡선
Fig. 8. Polarization switching current curves of PZT heterolayered films

그림 9는 PZT 이종층 박막의 인가전압에 따른 누설전류 밀도를 나타낸 것이다. 박막의 코팅 횟수가 증가함에 따라 누설전류 밀도는 감소하는 경향을 나타내었으며, 단일 조성의 PZT 박막의 누설전류 밀도와 비교하여 매우 우수한 특성을 나타내었다. 이는 PZT(30/70) 박막과 PZT(70/30) 박막의 계

면이 캐리어의 포획중심으로 작용하며, 또한 코팅 횟수가 증가함에 따라 이러한 계면이 증가하기 때문으로 사료되어진다. 특히 PZT-5, 6 박막의 경우 5V의 인가전압에 대해 10^{-8} A/cm² 이하의 매우 우수한 누설전류 밀도 특성을 나타내었으며, 기억소자의 전하축적 물질로의 응용이 가능하리라 생각된다. 그러나 PZT 이종층 박막의 누설전류의 기구에 대해서는 아직 완전히 규명되어 있지 않으며, 향후 지속적인 연구와 논의가 요구된다.

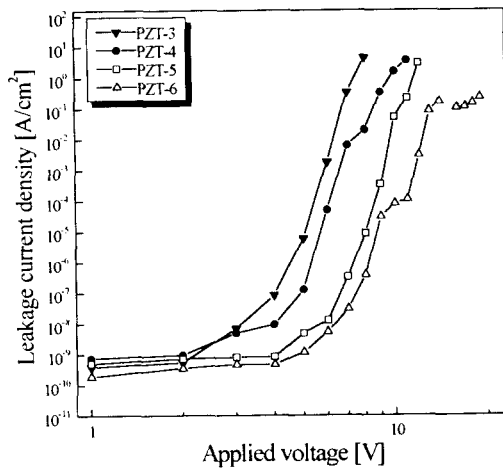


그림 9 PZT 이종층 박막의 인가전압에 따른 누설전류 밀도
Fig. 9 Leakage current characteristics with the applied voltage for PZT heterolayered films

4. 결 론

본 연구에서는 스펀-젤법을 이용하여 PZT(30/70)과 PZT(70/30) 코팅 용액을 제조한 후, 스펀 코팅법을 이용하여 Pt/Ti/SiO₂/Si 기판상에 PZT(30/70)/PZT(70/30) 이종층 박막을 제작하였다. 1회 코팅과 열처리를 행한 박막의 평균 두께는 약 40-50nm이었으며, 모든 PZT 이종층 박막은 이차상 및 rosette구조가 없는 치밀하고 균일한 미세구조를 나타내었다. PZT 이종층 박막의 유전상수, 잔류분극 및 누설전류 밀도 특성은 단일 조성의 PZT(30/70) 박막과 PZT(70/30) 박막에 비해 매우 우수한 특성을 나타내었다. 이는 상부의 PZT 박막 열처리시 하부의 PZT 박막이 nucleation site로 작용하였으며, 특히 PZT(30/70) 박막과 PZT(70/30) 박막의 계면이 캐리어의 포획중심으로 작용함에 따른 결과로 사료되며, PZT-6 박막의 경우 각각 975, 21 μC/cm² 및 8×10^{-9} A/cm²의 우수한 특성을 나타내었다. 또한 PZT 이종층 박막은 10⁸의 스위칭 펄스의 인가 후에도 잔류분극 및 항전계에 대해 매우 우수한 피로특성을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 1998 학년도 광운대학교 교내 학술 연구비에 의해 연구된 결과이며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Y. Ohba, M. Miyauchi, T. Tsurumi and M. Daimon, "Analysis of Bending Displacement of Lead Zirconate Titanate Thin Film Synthesized by Hydrothermal Method", Jap. J. Appl. Phys., vol. 32, no. 9B, pp. 4095-4098, 1993
- [2] N. Nagao, T. Takeuchi and K. Iihima, "Preparation and Properties of (Pb,La)TiO₃ Pyroelectric Thin Films by RF-Magnetron Sputtering", Jap. J. Appl. Phys., vol. 32, no. 9B, pp. 4065-4068, 1993
- [3] W. Lin, T. Tseng, S. Lin, S. Tu and S. Yang, "Influence of Crystal Structure on the Fatigue Properties of Pb_{1-x}La_x(Zr_yTi_{1-y})O₃ Thin Films Prepared by Pulsed-Laser Deposition Technique", J. Am. Ceram. Soc., vol. 80, no. 5, pp. 1065-1072, 1997
- [4] R. Waser, "Dielectric Analysis of Integrated Ceramic Thin Film Capacitors", Integrated Ferroelectrics, vol. 15, pp. 39-51, 1997
- [5] H. Doi, T. Atsuki, N. Soyama, G. Sasaki and K. Ogi, "Influence of Buffer Layers on Microstructural and Ferroelectric Characteristics of Sol-Gel Derived PbZr_xTi_{1-x}O₃ Thin Films", Jap. J. Appl. Phys., vol. 33, no. 9B, pp. 5159-5166, 1994
- [6] A. Grill, R. Laibowitz, D. Beach, D. Neumayer and P. R. Duncombe, "Effect of Base Electrode on the Crystallization and Electrical Properties of PLT", Integrated Ferroelectrics, vol. 14, pp. 211-217, 1997
- [7] T. Nakamura, Y. Nakao, A. Kamisawa and H. Takasu, "Electrical Properties of Pb(Zr,Ti)O₃ Thin Film Capacitors on Pt and Ir Electrodes", Jap. J. Appl. Phys., vol. 34, no. 9B, pp. 5184-5187, 1995
- [8] H. N. Al-Shareef, B. A. Tuttle, W. L. Warren, J. A. Voigt and R. D. Nasby, "Effect of B-site cation stoichiometry on electrical fatigue of RuO₂/Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃/RuO₂ Capacitors", J. App. Phys., vol. 79, no. 2, pp. 1013-1016, 1996
- [9] H. Suzuki, S. Kaneko, K. Murakami and T. Hayashi, "Low-Temperature Processing of Highly Oriented Pb(Zr_xTi_{1-x})O₃ Thin Film with Multi-Seeding Layers", Jap. J. Appl. Phys., vol. 36, no. 9B, pp. 5803-5807, 1997
- [10] I. Kanno, S. Hayashi, T. Kamada, M. Kitagawa and T. Hirao, "Low-Temperature Preparation of Pb(Zr, Ti)O₃ Thin Films on (Pb,La)TiO₃ Buffer Layer by Multi-Ion-Beam Sputtering", Jap. J. Appl. Phys., vol. 32, no. 9B, pp. 4057-4060, 1993
- [11] M. Shimizu, M. Sugiyama, H. Fujisawa and T. Shiosaki, "Control of Orientation of Pb(Zr,Ti)O₃ Thin Films Using PbTiO₃ Buffer Layer", Jap. J. Appl.

- Phys., vol. 33, no. 9B, pp. 5167-5171, 1994
- [12] S. G. Lee, I. G. Park, S. G. Bae and Y. H. Lee, "Dielectric Properties of Pb(Zr,Ti)O₃ Heterolayered Films Prepared by Sol-Gel Method", Jap. J. Appl. Phys., vol. 36, no. 11, pp. 6880-6883, 1997
- [13] G. J. Willems, D. J. Wouters and H. E. Maes, "Nucleation and Orientation of Sol-Gel PZT Films on Pt Electrodes", Integrated Ferroelectric, vol. 15, pp. 19-28, 1997
- [14] 이성갑, 이영희, "Sol-Gel법으로 제조한 PZT(20/80)/PZT(80/20) 이중층 박막의 유전특성", 한국전기전자재료학회 논문지 제11권 제11호 pp.990-995, 1998
- [15] S. G. Lee, K. G. Kim, S. G. Bae and Y. H. Lee, "Structural and Dielectric Properties of Pb(Zr,Ti)O₃ Heterolayered Films Prepared by Sol-Gel Method", Int. Conf. on Electrical Engineering, Kyungju, Korea, pp. 906-910, 1998
- [16] G. Teowee, J. M. Boulton, M. N. Orr, S. C. Lee, K. F. Galloway and R. D. Schrimpf, "Effect of Zr/Ti Ratio on the Ferroelectric Properties of Sol-Gel Derived PZT Films", Proc. IEEE Symp. Application of Ferroelectric, Greenville, USA, pp. 424-428, 1992
- [17] H. Maiwa, N. Ichinose and K. Okazaki, "Fatigue and Refreshment of (Pb,La)TiO₃ Thin Films by Multiple Cathode Sputtering", Jap. J. Appl. Phys., vol. 33, no. 9B, pp. 5244-5248, 1994

저 자 소 개



김 경 균(金景均)

1972년 3월 31일생. 1997년 서남대 공대 전자공학과 졸업. 1999년 광운대 대학원 전자재료공학과 졸업예정(석사). 현재 광운대학교 대학원 전자재료공학과 석사과정.

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



정 장 호(鄭長鎬)

1962년 4월 10일생. 1987 광운대 공대 전자재료공학과 졸업. 1990년 광운대 대학원 전자재료공학과 졸업(석사). 1997년 광운대 대학원 전자재료공학과 졸업(공박).

Tel : 02-940-5164, Fax : 02-915-8084
E-mail : cheel@daisy.kwangwoon.ac.kr



이 성 갑(李成甲)

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

Tel : 0671-620-5246, Fax : 0671-33-9306
E-mail : isgap@tiger.seonam.ac.kr



이 영 희(李永熙)

1973년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 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