

스테인레스 스틸 기판 위에 제조된 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.45}\text{Ti}_{0.55})\text{O}_3$ 후막의 강유전 특성

이 지 현

나노입자제어기술연구단, 서울대학교 정밀기계설계공동연구소
(2000년 7월 11일 접수)

$\text{Pb}(\text{Zr}_{0.45}\text{Ti}_{0.55})\text{O}_3$ Ferroelectric Thick Films on Stainless Steel Substrates

Ji-Hyun Yi

National CRI Center for Nano Particle Control, Institute of Advanced Machinery and Design,
Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

(Received July 11, 2000)

초 록

스테인레스 스틸 기판 위에 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.45}\text{Ti}_{0.55})\text{O}_3$ 후막을 졸-겔 스펀 코팅법으로 제조하였다. 스테인레스 스틸은 그 자체로 좋은 도체이지만 PZT 후막의 강유전 특성을 개선하고자 RuO_2 박막을 중간층 겸 하부전극으로 사용하였다. PZT 전구체 용액을 코팅하고 급속 열처리하였을 때 550°C 이하에서 pyrochlore 상이 먼저 나타났고 이 transient 상은 610°C 에서 모두 perovskite 상으로 변화하였다. 600°C 에서 열처리된 PZT 후막은 잔존하는 pyrochlore로 인해 걸어진 전기장에 무관하게 $5\text{-}7 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 의 낮은 P_r 값을 나타내었으나 610°C 이상에서 열처리된 시편들은 모두 $25 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 이상의 잔류분극을 가지고 있었다. 또한 RuO_2 중간층이 PZT의 강유전성에 미치는 영향을 조사하였을 때 잔류분극 값은 거의 영향을 받지 않았으나 항전계 값은 상당한 영향을 받았다. 즉 100 nm 두께의 RuO_2 박막을 중간층으로 사용할 경우 중간층 없이 직접 스테인레스 스틸 위에 코팅할 때에 비해 항전계 값을 45% 가량 줄일 수 있었다

ABSTRACT

This paper deals with the chemical preparation of $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.45}\text{Ti}_{0.55})\text{O}_3$ thick films onto stainless steel substrates. Although stainless steel is a good electric conductor, we have prepared PZT films on stainless steel with an intermediate RuO_2 thin film in order to improve the ferroelectric properties of PZT. As-deposited PZT films crystallized into a pyrochlore phase at temperatures below 550°C . Then it can be supposed that the transformation of this transient phase into the perovskite phase had been archived at 610°C . The film annealed at 600°C exhibited very low P_r ($5\text{-}7 \mu\text{C}/\text{cm}^2$) for the whole range of applied electric field because of the remaining pyrochlore phase in the PZT film, however, the P_r reached about $25 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ for the films heat-treated at 610°C and above. While the intermediate RuO_2 thin film didn't make significant contribution to the values of P_r , a decisive influence on the E_c has been found. That is, the RuO_2 bottom electrodes reduced the values of E_c by 45%.

Key words : PZT, Stainless steel, RuO_2 , Ferroelectric thick films

1. 서 론

PZT 박막 및 후막은 강유전성과 압전성이 우수하여 메모리 소자, 센서, 액츄에이터 등 매우 넓은 응용 분야를 가지고 있다.¹⁻³⁾ 일반적으로 PZT 필름은 반도체 칩에 집적될 것을 고려하여 주로 백금 전극을 입힌 실리콘 웨이퍼 위에 제조되며 그 외의 기판에 PZT 필름을 성장시킨 예는 거의 없다. 기판이나 전극이 PZT 필름의 결정화 거동과 유전성에 상당한 영향을 끼친다는 것은 이미 잘 알려진 사실이며,⁴⁾ 금속이나 유리 기판을 사용하여 PZT 필름의 응용 분야의 폭을 넓히고자 하는 몇몇 시도가 있었으나^{5,6)} 별다른 주목을 끌지는 못 했다. 그런데 근래에 Seifert⁷⁾ 등은 초소형 압전 모터나 벨브로의 응용 가능성이 있는 PZT 박막을 스테인레

스 스틸 기판 위에 제조하였다. 또한 Averty와 Gundel⁸⁾ 등은 “강유전체에서의 전자 방출 현상”⁹⁾을 이용한 평판형 전자총을 연구함에 있어 스테인레스 스틸 기판 위에 성장시킨 PZT 필름을 사용하고 있다. 취성이 높은 실리콘 기판에 비하여 스테인레스 스틸 기판은 기계적 강도가 높고 유연성이 좋을 뿐만 아니라 저렴하여 PZT 박막이나 후막이 도포될 경우 새로운 응용 분야를 개척할 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 스테인레스 스틸 기판은 실리콘웨이퍼에 비하여 표면이 거칠고 낮은 온도에서도 산화되기 쉽다. 또한 전구체 용액을 사용하여 스테인레스 스틸 위에 막을 도포하는 경우 산(acid)에 약하므로 전구체 제조시 제약이 따른다. 이와같이 스테인레스 스틸을 강유전체 필름의 기판으로 사용하기 위해서는 해결해야 할 몇 가지 문제점들이 있다. 금속 기판

으로서의 장점을 유지하는 동시에 실리콘 웨이퍼 위에서와 같은 전기적 물성을 지니는 PZT 막을 얻기 위해서는 보다는 많은 연구가 필요하다.

스테인레스 스틸은 그 자체가 뛰어난 전기 도체이지만 본 연구에서는 PZT 후막의 강유전성을 개선하기 위하여 RuO₂ 박막을 중간층(intermediate layer) 겸 하부전극(bottom electrode)으로 사용하였다. RuO₂는 산화물이지만 화학양론적 조성에서도 비저항 값이 35 μΩ·cm에 이르는 훌륭한 도체이다.¹⁰⁾ RuO₂는 뛰어난 diffusion barrier로 알려져 있으며 FRAM 응용분야에서 일반적으로 쓰이는 금속 전극(Pt, Au)에 비하여 산소 빈자리 문제를 쉽게 해결 할 수 있어 PZT 박막이 겪는 피로현상을 개선할 수 있는 전극으로 관심을 끌고 있다.¹¹⁻¹³⁾ RuO₂ 박막은 주로 물리적 증착법으로 제조되나 본 연구에서는 공정을 간소화하고 비용을 줄이기 위해 개발된 RuO₂ 전구체 용액을 스핀코팅(spin-coating)을 사용하여 스테인레스 스틸 기판 위에 도포하였고 그 위에 PZT 후막을 역시 스핀코팅으로 제조하고 열처리 한 후 미세구조와 강유전 특성을 규명하였다.

2. 실험방법

2.1. RuO₂ 박막의 제조

중간층인 RuO₂를 제조하기 위한 precursor는 ruthenium (III) nitrosyl nitrate, Ru(NO)(NO₃)₃ 용액(Alfa)을 2-methoxyethanol (Alfa, 99.34%)에 희석하여 사용하였다. 전구체 제조에 대한 보다 자세한 내용은 참고문헌에 언급되어 있다.¹⁴⁾ 스테인레스 스틸 기판으로는 AISI 304 (20 mm×20 mm×0.2 mm)가 선택되었고 표면에 남아 있을 수 있는 불순물을 제거하기 위해 초음파 세척기에서 propanol 및 ethanol로 각각 10분씩 세척한 후 질소 jet로 건조하였다.

스핀코팅은 TP1100 spinner를 사용하였으며 사용된 회전 가속도, 속도 및 시간은 각각 400 rpm/s, 4000 rpm, 30초였다. 전구체 용액이 도포된 후 300°C에서 1분간 건조되었고 RuO₂ 층의 최종 두께를 20-200 nm 사이에서 변화시키기 위하여 스핀코팅과 건조가 1-10회 반복된 후 400°C에서 10분간 최종 열처리하였다.

스테인레스 스틸 기판 위에 코팅된 RuO₂ 박막의 비저항은 직접 측정하기가 불가능하므로 실리콘 웨이퍼에 동일한 조건으로 코팅하고 열처리한 후 전통적인 four-point probe 방법으로 측정하였다. 비저항 값은 RuO₂ 막의 두께에 따라 190-250 μΩ·cm 사이에서 변화하였다.

2.2. PZT 후막의 제조

Pb(Zr_{0.45}Ti_{0.55})O₃ 전구체 용액을 제조하기 위하여 Pb(CH₃CO₂)₂·3H₂O (Prolabo, 99.99%)를 60°C에서 아세트산에 용해시키고 다시 상온으로 냉각시킨 후 Zr[O(CH₂)₂CH₃]₄ (Prolabo, 99.9%)와 Ti[O(CH₂)₂CH₃]₄ (Alfa, 99.99%)를 차례대

로 첨가하였다. 금속 알콕사이드가 공기 중의 수분과 반응하는 것을 방지하기 위해 모든 과정은 clean room에서 건조 공기 분위기 하에 진행되었다. 제조된 PZT 전구체 용액을 0.2 μm 크기의 필터로 걸러 유입될 수 있는 불순물을 최대한 억제하였다. 이미 RuO₂ 박막이 입혀져 있는 스테인레스 스틸 기판 위에 스피너를 이용하여 PZT 필름을 도포하였다. 스핀코팅의 조건은 가속도 : 6000 rpm/s, 속도 : 6000 rpm, 시간 : 20초였다. 도포된 PZT green film은 550-650°C 온도 범위에서 1분간 급속열처리(rapid thermal annealing) 되었다. 2-4 μm의 최종 두께를 얻기 위하여 코팅과 급속열처리 과정이 6-10회 반복되었다.

2.3. PZT 후막의 물성 측정

RuO₂/stainless-steel 기판 위에 제조된 PZT의 결정화과정과 중간층인 RuO₂과의 상호작용 등을 조사하기 위해 Siemens D5000 X선 회절분석기(θ/θ, CuK_α radiation)를 사용하였으며 기판에 비해 상대적으로 회절강도가 낮은 PZT 회절패턴의 noise를 줄이기 위하여 step 크기는 0.02°으로, scan 속도는 step당 10초로 회절분석을 실시하였다. PZT 및 RuO₂의 morphology와 cross section은 주사전자현미경(Jeol 6400)으로 관찰되었다. PZT 필름의 전기적 성질을 조사하기 위하여서는 상부전극이 필요하므로 photolithography 기술을 사용하여 gold 전극(0.0012 cm²)을 진공증착하였다. 강유전 이력곡선은 전통적인 Sawyer-Tower 회로를 사용하여 50 Hz의 sinusoidal 전기장에서 얻어졌다. 각 캐패시터에 대해 전기장을 높이면서 breakdown이 일어날 때까지 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. PZT 후막의 미세구조

RuO₂/stainless-steel 기판 위에 도포된 PZT 후막의 결정화과정 및 미세구조를 조사하기 위하여 중간층인 RuO₂의 두께를 100 nm로, PZT 막의 두께를 2.2 μm로 고정된 후 PZT 필름의 열처리 온도를 550-650°C로 변화시키면서 XRD 회절분석을 실시하였다. Fig. 1이 보여주는 바와 같이 550°C에서 최초로 결정상이 나타나고 있다. 하지만 이는 perovskite 상이 아니라 pyrochlore 상임을 확인 할 수 있었다. 열처리 온도가 575°C로 올라가면서 pyrochlore 상의 피크 강도는 거의 변하지 않은 반면 perovskite 상에 해당하는 피크가 처음으로 관찰되고 있다. 온도가 600°C로 올라가면서 perovskite 피크 강도는 급격히 증가하고 pyrochlore 피크 강도는 현저히 줄어들어 610°C 이후로는 완전히 사라지고 있다. 즉 PZT green film은 pyrochlore 상으로 결정화가 시작되며 이 transient phase는 610°C에서 완전히 perovskite 상으로 변화됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 Si wafer 기판 위에서 졸-겔법으로 제조된 PZT의 경우에서도 흔히

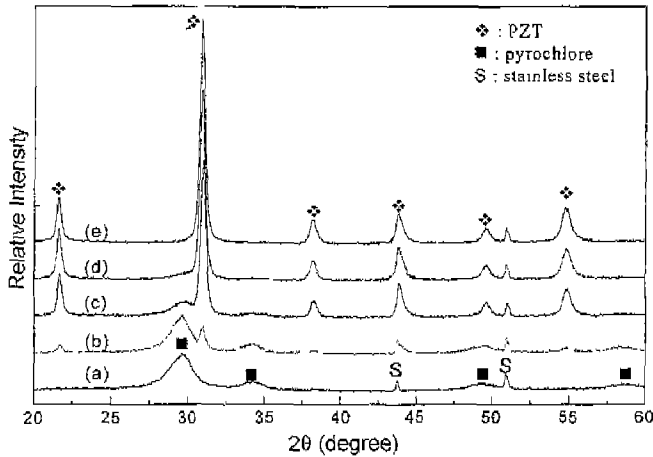


Fig. 1. XRD patterns versus the temperature of the PZT films on a RuO₂ coated stainless steel substrates (a) 550°C, (b) 575°C, (c) 600°C, (d) 610°C, (e) 625°C.

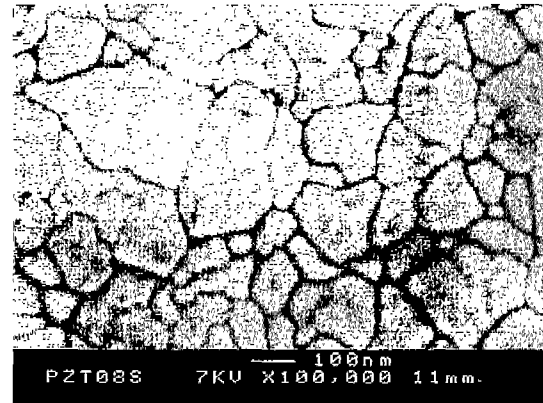
관찰되는 것이다.¹⁵⁾

한편 rutile 상에 해당하는 회절 피크는 관찰되지 않았는데 이는 PZT 막이 두꺼워(2.2 μm) 거의 모든 입사 빔을 흡수했기 때문일 것으로 여겨진다. 또한 모든 온도 범위에 걸쳐 XRD 분석으로 관찰될 정도의 PZT-RuO₂ 혹은 PZT-스테인레스 스틸 사이의 상호작용이나 화학반응은 없는 것으로 나타났다. 다만 600°C에서 Bragg angle=29° 부근에 남아 있는 피크의 경우 transient 상으로 생성되었던 pyrochlore 상이 아직 완전히 perovskite 상으로 변하지 않고 잔존하는 것인지 아니면 PZT-RuO₂ 반응으로 인해 생성된 또 다른 pyrochlore 상, 예를 들면 Pb₂Ru₂O₇, Pb₂(Ru_{2-x}Pb_x)O_{6.5}^{16,17)}와 같은 것인지는 분명하지 않다.

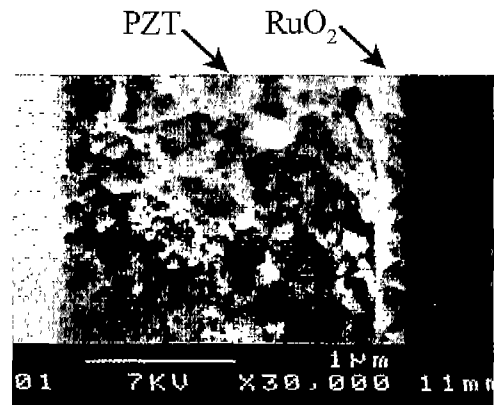
Fig. 2는 200 nm의 RuO₂가 입혀진 스테인레스 스틸 기판에 스펀코팅-급속열처리를 6회 반복하여 성장시킨 PZT 후막에 대한 주사전자현미경 사진이다. 이미지 분석 프로그램으로¹⁸⁾ 분석한 결과 입자의 평균 직경은 약 100 nm였고 균열이 없고 치밀한 표면이 관찰되었다. 이 샘플의 cross section 이미지를 관찰하였을 때 RuO₂와 PZT의 경계가 뚜렷하였고 상대적으로 얇은 RuO₂ 박막의 두께도 위치에 무관하게 비교적 균일함을 알 수 있었다.

3.2. PZT 후막의 전기적 성질

열처리 온도가 PZT의 강유전 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 RuO₂ 하부전극의 두께를 100 nm로, PZT의 두께를 2.2 μm로 고정하고 열처리 온도를 575, 600, 610, 625, 650°C로 달리한 5개의 캐패시터에 대하여 강유전 이력곡선을 측정하였다. 575°C에서 열처리한 캐패시터는 잔류분극(remnant polarization, P_r) 값이 0 μC/cm²에 가깝게 나와 강유전체가 아닌 것으로 판명되었다. 나머지 4개 캐패시터의 잔류분극 값이 걸어준 전기장(electric field)에 대해 변



(a)



(b)

Fig. 2. SEM micrograph of PZT films (a), and the cross section (b) of PZT/RuO₂ on stainless steel substrates.

화하는 모습을 Fig. 3에 나타내었다. 610, 625, 650°C에서 열처리된 캐패시터들의 잔류분극 값은 서로 비슷한 거동을 보였다. 즉 약 300 kV/cm까지는 P_r 값이 약 20 μC/cm²로 급격히 증가하다가 그 이후로 P_r은 완만하게 증가하고 있다. 적용 전기장이 약 700 kV/cm일 때 P_r은 약 25 μC/cm²로 포화상태에 이르고 있다. 다만 650°C에서 열처리된 시편의 경우 적용 전기장이 620 kV/cm를 초과하자 dielectric breakdown이 일어나 더 이상의 측정이 불가능하였다.

한편 600°C에서 열처리한 캐패시터는 걸어준 전기장에 관계없이 매우 낮은 P_r 값 (5-7 μC/cm²)을 나타내었다. 이는 XRD 분석에서 확인한대로 잔존하는 pyrochlore로써 설명될 수 있다. 즉 열처리 온도 600°C는 transient 상인 pyrochlore를 완전히 perovskite로 변화시키기에는 다소 낮은 온도이며 생성된 perovskite 상도 그 결정성이 낮아 결과적으로 현저히 낮은 잔류분극 값을 나타낸다고 볼 수 있다.

Fig. 4는 위와 동일한 캐패시터들에 대한 항전계(coercive field, E_c)의 변화를 보여주고 있다. E_c 값은 걸어준 전기장이 300 kV/cm일 때까지는 가파르게 증가하다가 그 이후로는 매우 완만한 증가를 나타내고 있다. 적용 전기장 1000

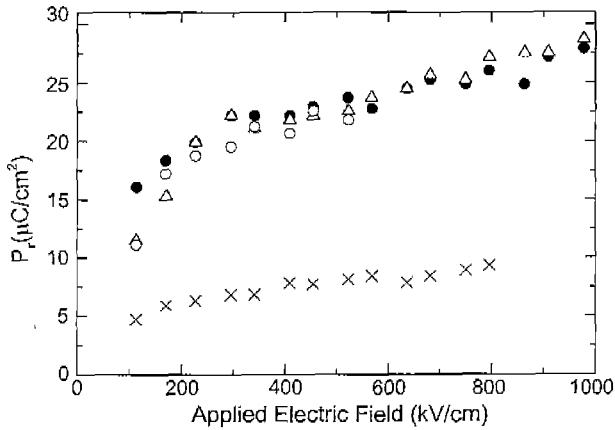


Fig. 3. Remnant polarization of the PZT on RuO_2 coated stainless steel substrates as a function of the applied electric field for different annealing temperatures of the PZT films (× 600°C, ● 610°C, △ 625°C, ○ 650°C).

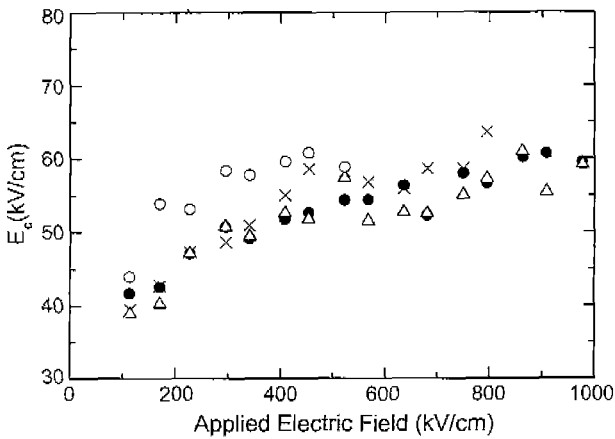


Fig. 4. Coercive electric field of the PZT on RuO_2 coated stainless steel substrates as a function of the applied electric field for different annealing temperatures of the PZT films (× 600°C, ● 610°C, △ 625°C, ○ 650°C).

kV/cm 에서도 E_c 값은 약 60 kV/cm 에 머물고 있다. 시편의 열처리 온도에 관계없이 유사한 결과를 얻었으나 다만 650°C에서 처리한 캐패시터는 상대적으로 다소 높은 E_c 값을 나타내었다.

중간층으로 사용한 RuO_2 의 두께가 PZT의 강유전 특성에 미치는 영향을 규명하기 위하여 RuO_2 의 두께를 0-200 nm로 변화시키며 Au/PZT/ RuO_2 /Stainless-steel 캐패시터를 제조하였다. 이 때 사용된 PZT 후막의 두께와 열처리 온도는 각각 2.2 μm 와 610°C로 고정하였다. Fig. 5는 적용한 전기장에 대한 잔류분극 값의 변화를 나타내고 있다. P_r 값은 허부전극 RuO_2 의 두께와는 무관하게 모두 비슷한 거동을 보이고 있다. 즉 RuO_2 층이 PZT 후막의 P_r 값에 기여하는 바는 거의 없다고 하겠다.

Fig. 6은 위와 동일한 캐패시터들에 대한 항전계 값의 변

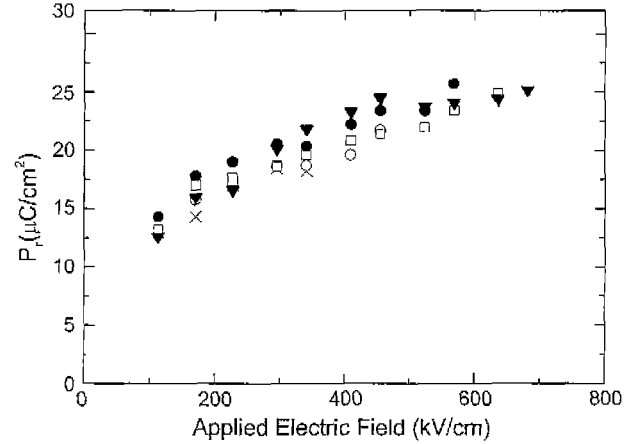


Fig. 5. Remnant polarization of PZT on RuO_2 coated stainless steel as a function of applied electric field for different thickness of RuO_2 (▼ without RuO_2 , × 20 nm, ○ 60 nm, ● 100 nm, □ 200 nm).

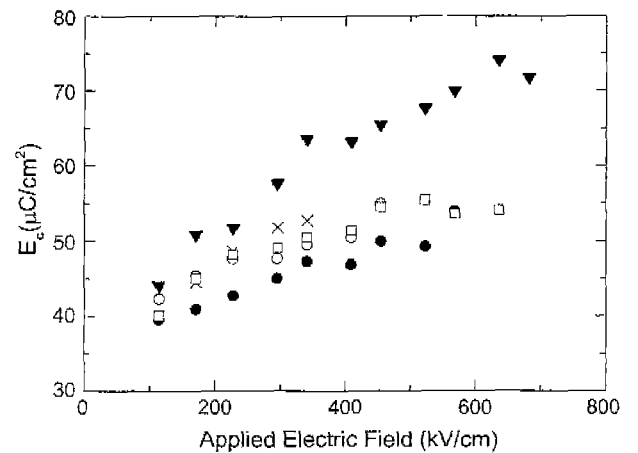


Fig. 6. Coercive field of PZT on RuO_2 coated stainless steel as a function of applied electric field for different thickness of RuO_2 (▼ without RuO_2 , × 20 nm, ○ 60 nm, ● 100 nm, □ 200 nm).

화를 나타내고 있다. 걸어준 전기장이 100 kV/cm 정도로 낮을 때는 RuO_2 중간층의 두께에 관계없이 유사한 E_c 값을 나타낸다. 그러나 적용된 전기장이 높아질수록 RuO_2 중간층을 사용하지 않은 캐패시터의 E_c 값은 현저히 증가하여 적용전기장 600 kV/cm 에서 75 kV/cm 부근까지 올라가지만 RuO_2 중간층을 사용한 캐패시터들의 E_c 값은 상대적으로 완만하게 증가하다가 적용전기장 600 kV/cm 에서 55 kV/cm 이하의 값으로 포화되고 있다.

Fig. 7은 RuO_2 중간층을 사용하지 않은 캐패시터(Au/PZT/Stainless-steel)와 100 nm 두께의 RuO_2 중간층을 사용한 캐패시터(Au/PZT/ RuO_2 /Stainless-steel)의 강유전 이력곡선을 비교하고 있다. 여기서 PZT 후막의 두께와 열처리 온도는 각각 2.2 μm 와 610°C로 고정하였다. 두 캐패시터 모두에게

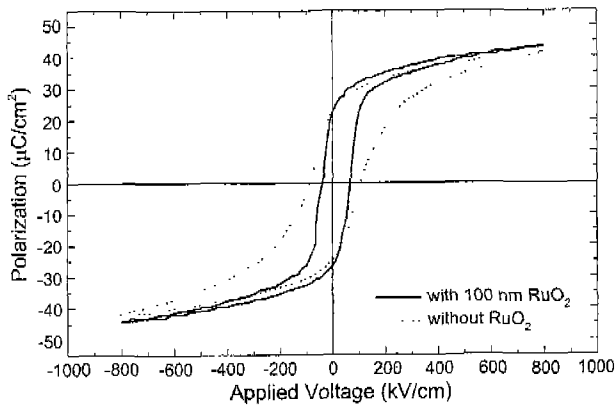


Fig. 7. Hysteresis loops of PZT on stainless steel substrates.

서 잘 포화된 이력곡선을 얻었으며 800 kV/cm의 전기장에서도 breakdown이 일어나지 않았다. 한편 두 캐패시터 모두 다소 비대칭적인 이력곡선을 보이는데 이는 두 캐패시터 모두가 각각 다른 하부전극과 상부전극(Au-stainless steel, Au-RuO₂)을 사용하면서 기인하는 것으로 여겨진다. 두 캐패시터는 서로 유사한 잔류분극 값(25 μC/cm²)을 가지고 있지만 항전계 값은 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 즉 RuO₂ 중간층을 사용하면 RuO₂를 사용하지 않고 직접 스테인레스 스틸 기판 위에 PZT를 성장시킬 때에 비해 E_c 값을 약 45% 감소시킬 수 있음을 보여주고 있다. 왜 이와 같은 현상이 일어나는지를 규명하기 위해서는 보다 근본적인 연구가 수행되어야 할 것이다. 결과적으로 RuO₂ 중간층을 사용하므로 인하여 P_r/E_c ratio를 0.25에서 0.47로 올릴 수 있었다. 높은 P_r/E_c 비는 “펄스 전기장에 의한 강유전체에서의 전자 방출”과 같이 fast switching이 필요한 응용분야에서 필수적인 것이다.¹⁹⁾

4. 결 론

본 연구에서는 스테인레스 스틸 기판 위에 $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.45}\text{Ti}_{0.55})\text{O}_3$ 후막을 졸-겔 스핀 코팅법으로 제조하였는데 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. RuO₂ 박막이 하부 전극으로 코팅된 스테인레스 스틸 기판 위에 도포된 PZT 후막을 급속 열처리했을 때 550°C 이하에서 pyrochlore 상이 먼저 나타났고 이 transient 상은 610°C에서 모두 perovskite 상으로 변화하였으며 PZT 후막의 표면은 치밀하고 균열이 없었다.
2. 600°C에서 열처리된 PZT 후막은 잔존하는 pyrochlore로 인해 걸어준 전기장에 무관하게 낮은 P_r 값(5-7 μC/cm²)을 나타내었으나 610°C 이상에서 열처리된 캐패시터들은 모두 25 μC/cm² 이상의 잔류분극을 가지고 있었다.
3. RuO₂ 중간층이 PZT 후막의 강유전성에 미치는 영향을 조사하였을 때 P_r 값은 거의 영향을 받지 않았으나 E_c

값은 상당한 영향을 받았다. 즉 100 nm 두께의 RuO₂ 박막을 중간층으로 사용할 경우 RuO₂ 중간층 없이 직접 스테인레스 스틸 위에 코팅할 때에 비해 E_c 값을 45% 가량 줄일 수 있었다.

감사의 글

본 연구에 도움을 준 프랑스 Nantes 대학교의 H. W. Gundel 교수에게 감사드린다.

REFERENCES

1. P. L. bmann, S. Seifert, S. Merklein and D. Sporn, “Lead Zirconate-Titanate Films Prepared from Soluble Powders,” *J. Sol-Gel Science and Technology*, **13**(1-3), 827-831 (1998).
2. G. Yi, Z. Wu and M. Sayer, “Preparation of $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ Thin Films by Sol Gel Processing: Electrical, Optical, and Electro-optic Properties,” *J. Appl. Phys.*, **64**(5), 2717-2724 (1988).
3. J. F. Scott and C. A. Paz de Araujo, “Ferroelectric Memories,” *Science*, **246**, 1400 (1989).
4. D. P. Vijay and S. B. Desu, “Electrodes for $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ Ferroelectric Thin Films,” *J. Electrochem. Soc.*, **140**, 2640-2645 (1993).
5. G. Yi, M. Sayer, Z. Wu, C. Jen and J. Bussiere, “Piezoelectric Lead Zirconate Titanate Coatings on Metallic Wires,” *Electron. Lett.*, **25**, 907-908 (1989).
6. G. Yi, Z. Wu, M. Sayer, C. Jen and J. Bussiere, “Sol Gel Processed Piezoelectric PZT Thin Films,” *Ceram. Transac.*, **11**, 363-374 (1990).
7. S. Seifert, H. Beige, M. Giersbach, T. Hauke, P. L bmann and D. Sporn, “Ferroelectric PZT Thin Films on Metallic Substrates: Preparation and Properties as Actor and Sensor Element,” *Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics*, **98CH36245**, 85-88 (1998).
8. D. Averty, H.W. Gundel, R. Seveno and R. Le Bihan, “Switching Kinetics of and Electron Emission from Ferroelectric Thin Films,” *Proceedings of the 11th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics*, **98CH36245**, 479-481 (1998).
9. H. Gundel, H. Ridge, J. Handerek and K. Zioutas, “Low-pressure Hollow Cathode Switch Triggered by a Pulsed Electron Beam Emitted from Ferroelectrics,” *Appl. Phys. Lett.*, **54**(21), 2071-2073 (1989).
10. H. Kezuka, R. Egerton, M. Masui, T. Wada, T. Ikehata, H. Mase and M. Takeuchi, “Electrical-Resistivity of RuO_x Thin-Films Prepared by Ion-Beam Sputter Deposition,” *Appl. Sur. Sci.*, **65-66**, 293-297 (1993).
11. H. N. Al-Shareef, K. R. Bellur, A. I. Kingon and O. Auciello, “Influence of Platinum Interlayers on the Electrical Properties of RuO₂/ $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.53}\text{Ti}_{0.47})\text{O}_3$ /RuO₂ Capacitor Heterostructures,” *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 239, (1995).
12. M. Klee, U. Mackens, W. Hermann and E. Bathelt, “Struc-

- tural and Electrical Characterization of PZT and PLZT Films Growing on Spin-on Processed Conductive Oxide Electrodes," *Integrated Ferroelectrics*, **11**, 247-258 (1995).
13. O. Auciello, A. R. Krauss, Y. Lin, R. P. H. Chang and D. M. Gruen, "In Situ, Real-Time Analysis of the Growth of Ferroelectric and Conductive Oxide Heterostructures by New Time-of-Flight Pulsed Ion Beam Surface Analysis Technique," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **341**, 385-391 (1994).
 14. J. H. Yi, P. Thomas, M. Manier and J. P. Mercurio, "Ruthenium Oxides Electrodes Prepared by Sol-Gel Spin Coating," *J. Phys. IV*, **8**(Pr9), 45-48 (1998).
 15. N. Tohge, S. Takahashi and T. Minami, "Preparation of PbZrO_3 - PbTiO_3 Ferroelectric Thin Films by the Sol-Gel Process," *J. Am. Ceram. Soc.*, **74**(1), 64-71 (1991).
 16. K. Watanabe, J. F. Tressler, M. Sadamoto, C. Isobe and M. Tanaka, "Characterization of Solution Derived RuO_2 Electrodes for $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ Microcapacitors," *J. Electrochem. Soc.*, **143**, 3008-3013 (1996).
 17. A. Iembo, F. Fusco, M. Allegrini, E. Arimondo, A. De-benedittis, A. Di Cristoforo, P. Mengucci, B. E. Watts and F. Leccabue, "Preparation of $\text{Pb}(\text{Ti,Zr})\text{O}_3/\text{RuO}_2$ Multilayers In Situ by Pulsed Laser Ablation Deposition," *Integrated Ferroelectrics*, **18**, 397-404 (1997).
 18. Matrox Inspector, Matrox Electronic Systems Ltd. (1995).
 19. D. Averty, J. L. Chartier, H. W. Gundel and R. Le Bihan, "Nanosecond Switching of Ferroelectric Thin Films for Application to a Short-Pulse Micro Electron Emitter," *Integrated Ferroelectrics*, **18**, 91-99 (1997).