

PZT 박막 캐피시터의 특성에 기여하는 PZT-전극 계면층의 영향

김태호 · 구준모 · 민형섭 · 이인섭* · 김지영

국민대학교 금속재료공학과

*동의대학교 신소재공학과

Effects of PZT-Electrode Interface Layers on Capacitor Properties

Taeho Kim, June-mo Koo, Hyungsub Min and Insub Lee* and Jiyoung Kim

Department of Materials Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea

*Department of Materials Engineering, Donggeui University, Pusan, Korea

(2000년 5월 8일 받음, 2000년 8월 21일 최종수정본 받음)

초 록 Metal-Ferroelectric-Metal(MFM) 구조의 캐피시터에서 Pb(Zr,Ti)O₃(PZT)-전극 계면층이 PZT 박막 특성에 기여하는 영향을 알아보기 위하여 Pt/PZT/계면층/Pt/TiO₂/SiO₂/Si 구조의 캐피시터를 제작하였다. 계면층으로 사용될 물질들 중에서 PbTiO₃(PT) 층을 sol-gel 방법으로 형성하였으며, PbO, ZrO₂, TiO₂ 층들은 reactive sputtering 방법으로 형성하였다. PZT 박막을 구성하는 원소들로 이루어진 단순 산화물들의 특성을 평가하기 위하여 PbO, ZrO₂, TiO₂를 계면층으로 사용하여 600°C에서 열처리를 실시하였고, 이 경우에는 TiO₂가 가장 우수하게 PZT의 결정립 크기를 미세하게 하는 효과를 보였으나, 두께가 증가함에 따라 표면 거칠기가 증가하고 anatase 상으로 남기 때문에 강유전특성이 열화되었다. 반면에 PT 박막을 계면층으로 사용한 경우에는 결정립 크기의 감소와 더불어 전기적인 특성도 향상되었다. 또한, PZT의 핵생성 위치를 판단하기 위하여 PT 삽입층의 위치를 변화하며 실험한 결과, 하부전극과 PZT 박막의 계면에 PT 삽입층을 형성하였을 경우에 가장 효과적인 seed로서의 역할을 하였다.

Abstract In order to study effects of interfacial layers between Pb(Zr,Ti)O₃(PZT) films and electrodes for Metal-Ferroelectric-Metal(MFM) structure capacitors, we have fabricated the capacitors with the Pt/PZT/interfacial-layer/Pt/TiO₂/SiO₂/Si structure. PbTiO₃(PT) interfacial layers were formed by sol-gel deposition and PbO, ZrO₂ and TiO₂ thin layers were deposited by reactive sputtering. TiO₂ interface layers result in the finest grains of PZT(crystalline Temp. 600°C) films compare to PbO₂ and ZrO₂ layers. However, as the thickness of TiO₂ layer increases, PZT thin films become rough and electrical characteristics were deteriorated due to remained anatase phase. On the other hand, PT interface layers result in improved morphology of PZT films and do not significantly change ferroelectric properties. It is also observed that seed layers at the middle and top of PZT films do not give significant effects on grain size but the PT seed layer at the interface between the bottom electrode and the PZT films results in the small grain size.

Key words : MFM, PZT, Pt, PbO, ZrO₂, TiO₂, seed layer.

1. 서 론

PZT(Pb(Zr,Ti)O₃), BST((Ba,Sr)TiO₃) 등 강유전체 물질들은 높은 유전율로 인해 휘발성 기억소자인 DRAM 캐피시터용 유전체로서 사용하려는 연구가 활발히 진행되어 오고 있다.^{1~3)} 기억소자용으로서의 강유전체 박막의 응용은 DRAM(Dynamic Random Access Memory)에만 국한된 것이 아니라, 강유전체 고유의 강유전 특성을 활용한 비휘발성 FeRAM(Ferroelectric Random Access Memory) 분야에서도 널리 연구되고 있다. FeRAM은 DRAM에 상응하는 빠른 정보처리 속도와 더불어, 전원 공급이 차단되었을 때에도 계속 정보를 유지할 수 있는 비휘발성 특징과 더불어 저전압, 저전력 구동의 장점을 갖는 차세대 기억 소자로 활용될 것이 예상된다.^{4~6)}

강유전체 물질층의 하나인 PZT는 결정화 시에 rosette

형태의 조대한 결정립을 형성하는 경우가 있다. 이와 같은 조대한 결정의 결정립계에는 산소 공공이나 결함 등이 집중되어 결정립계의 존재로 인한 소자간의 불균일성을 유발한다.^{7~10)} 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위한 방법으로서 PZT 박막을 하부전극 위에서 epitaxial 성장을 시키거나, 결정립을 미세하게 하여야 할 필요가 있다. 그러나 PZT 박막을 epitaxial로 성장시키기에는 결정구조와 공정측면에서 많은 어려움이 있다. 반면에 결정립을 미세하게 할 경우에는 결정립계의 면적은 크게 증가하지만, 상대적으로 결정립계에서의 산소 공공과 결함의 농도가 감소하여 전체적인 소자의 불균일 특성을 해결할 수 있다. 결정립 크기를 미세화하는 방법으로는 Ti/Zr의 조성비율에서 Ti의 비율을 높이는 방법^{11,12)}과 열적구배를 이용하여 PZT의 결정을 단결정 또는 극미세 결정립으로 성장시키는 방법^{13~16)}이 있으며 또한, seed layer를 통하여 PZT의 결정 크기를 감소시키

는 방법이 제시되고 있다.^{17,18)} PZT 박막의 seed로는 PT (PbTiO₃) 혹은 TiO₂ 등이 거론되고 있는데, 이러한 seed를 사용하여 PZT의 결정화 열처리를 실시하였을 경우, seed가 PZT의 결정화 온도를 낮추어 주어, 그에 따라 PZT는 많은 핵생성 자리를 제공받아 결정립이 미세해지고, 막질을 향상시켜 준다고 보고되고 있지만^{19~21)}, 계면층의 역할은 아직 확실히 밝혀지고 있지는 않다.

본 연구의 목적은 PT, PbO, ZrO₂, TiO₂ 등의 여러 가지 박막을 PZT 박막의 seed로 사용하였을 때, 박막에 미치는 미세 구조적, 전기적 특성에 대한 영향을 알아보는 데 초점을 맞추었다. PZT를 구성하고 있는 단순 금속 산화물인 PbO, ZrO₂, TiO₂ 등의 물질 중에서 제일 우수한 특성을 보인 TiO₂에 대해서는 계면층 두께에 따른 PZT 박막의 형태를 조사하였다. 또한 PZT 박막 내에서의 seed의 효율적인 위치를 알아보기 위하여 자유계면, PZT 박막의 내부, PZT 박막과 하부전극과의 사이에 PT 계면층을 형성한 후에 PZT 박막의 특성을 관찰하였다.

2. 실험 방법

실험에 사용된 기판은 P형 Si(100)에 열 산화를 통해 SiO₂ 6000 Å을 성장시킨 웨이퍼를 사용하였다. SiO₂ 층위에 금속 전극과의 접착성을 향상시키기 위하여 TiO₂ 접착층을 산소 분위기에서 DC reactive sputtering을 통해 300 Å을 증착하였고, 그 위에 하부전극으로 Pt, Ir 등을 DC sputtering으로 2000 Å 증착하였다. PT 계면층은 sol-gel 방식으로 형성하였으며, PbO, TiO₂, ZrO₂ 등의 박막

층은 reactive sputtering 방법으로 증착하였다. 증착 조건은 표 1과 같다.

PZT는 sol-gel 방법으로 3000 Å을 증착하였고, 소결은 120℃, 400℃에서 각각 30분간 실시하였고 결정화 열처리는 600℃, 산소 분위기에서 30분간 진행하였다. 상부 전극은 shadow mask를 이용하여 Pt, Ir 등을 1500 Å 증착하였고, 그 면적은 2.1×10⁻⁴cm²이다. 그리고, 실험에 사용된 PZT precursor는 일본 고순도 화학에서 제작한 Zr/Ti 비가 52 : 48이고 Pb가 10% 과잉으로 첨가된 Pb1.1(Zr, Ti)O₃ precursor를 사용하였다. 제작된 시편의 PZT 박막은 Olympus사가 제작한 Normalski 광학 현미경을 사용하여 표면을 관찰하였다. 그리고 PZT 박막의 이력곡선과 pulse measurement는 RT-66A (Radiant Technology, Inc)의 charge program을 이용하여 가상 접지 모드 (Virtual ground mode)에서 측정하였다. 누설 전류 측정은 HP4140B를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 Pt, Ir 전극 위에서의 PZT 박막의 표면 사진이다. Pt 전극 위의 PZT의 표면은 2-4µm의 결정립 크기를 가지고 있으며 Ir 전극을 사용한 경우, PZT의 결정립 크기는 1-2µm의 크기로 Pt 전극 위에 증착된 PZT의 결정립보다 작게 형성되었지만, rosette 형태의 결정립이 형성되었고 XRD 분석결과 PZT 박막은 pyrochlore 상이 상당부분 존재하여 Pt 전극 위의 PZT 박막 보다 상대적으로 perovskite 상의 밀도가 낮게 관찰되었다. 이와 같이 Pt, Ir

Table 1. The deposition conditions of electrodes and interface layers.

| Materials | Pressure | Power | deposition time | Thickness | Ar : O ₂ sccm |
|------------------|----------|------------------|-----------------|-----------|--------------------------|
| Pt | 8mmTorr | DC 30W | 7min 30sec | 2000Å | 20 : 0 |
| Ir | 8mmTorr | DC 30W | 15min | 2000Å | 20 : 0 |
| TiO ₂ | 8mmTorr | DC 60W reactive | 20min | 300Å | 10 : 10 |
| PbO | 8mmTorr | RF 100W reactive | 45sec | 300Å | 10 : 10 |
| ZrO ₂ | 8mmTorr | DC 60W reactive | 2min | 300Å | 10 : 10 |

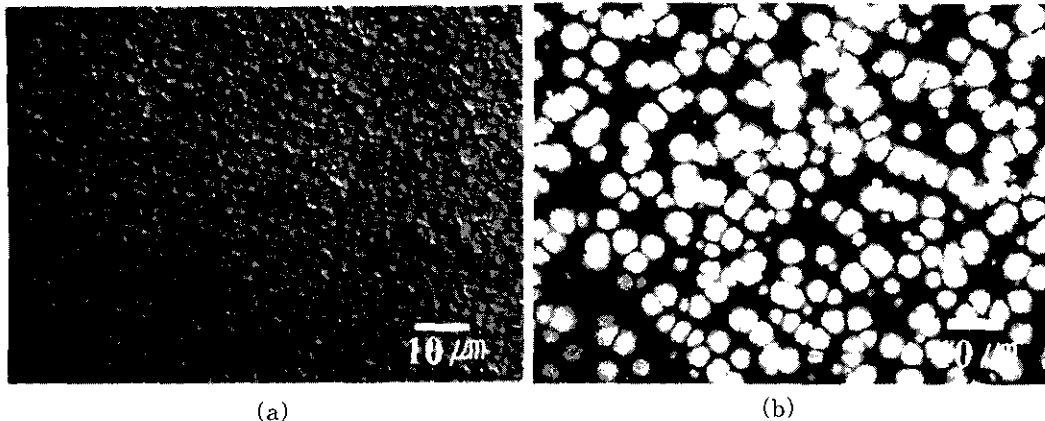


Fig. 1. The images of crystalline PZT on Pt and Ir electrodes. (a) PZT/Pt (b) PZT/Ir

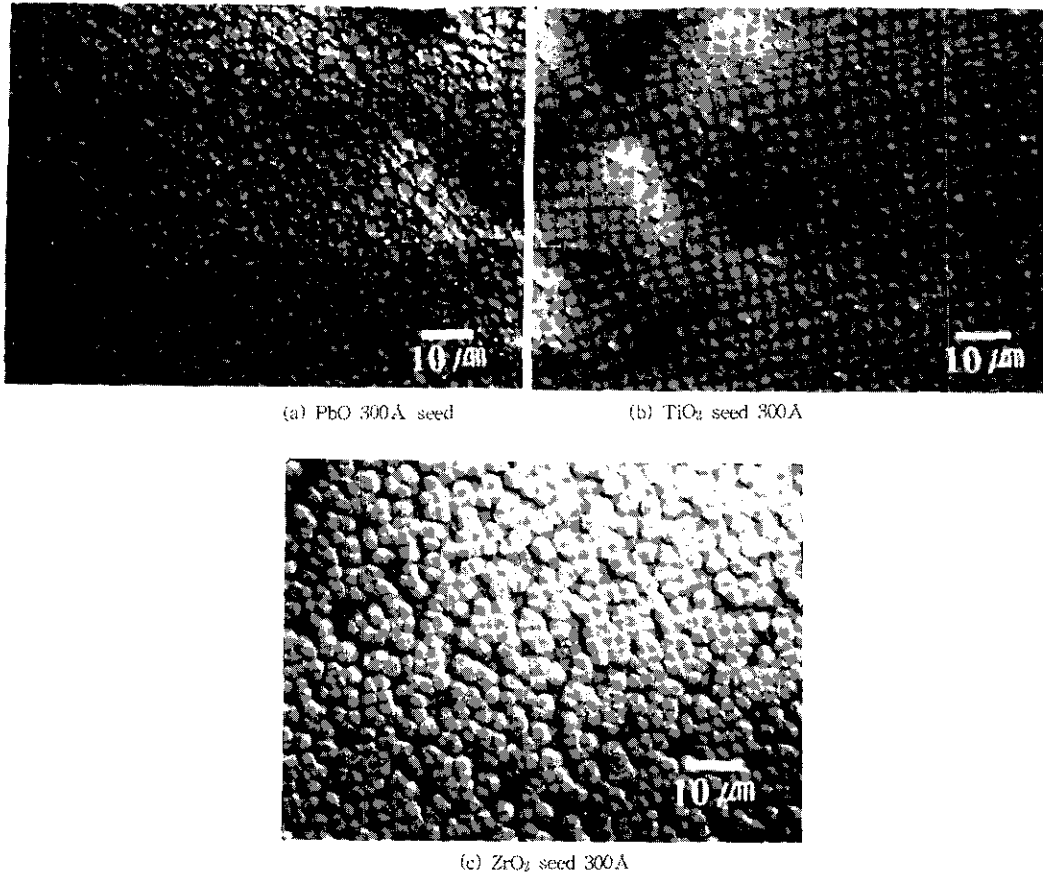


Fig. 2. The images of PZT thin films with various seed layers.

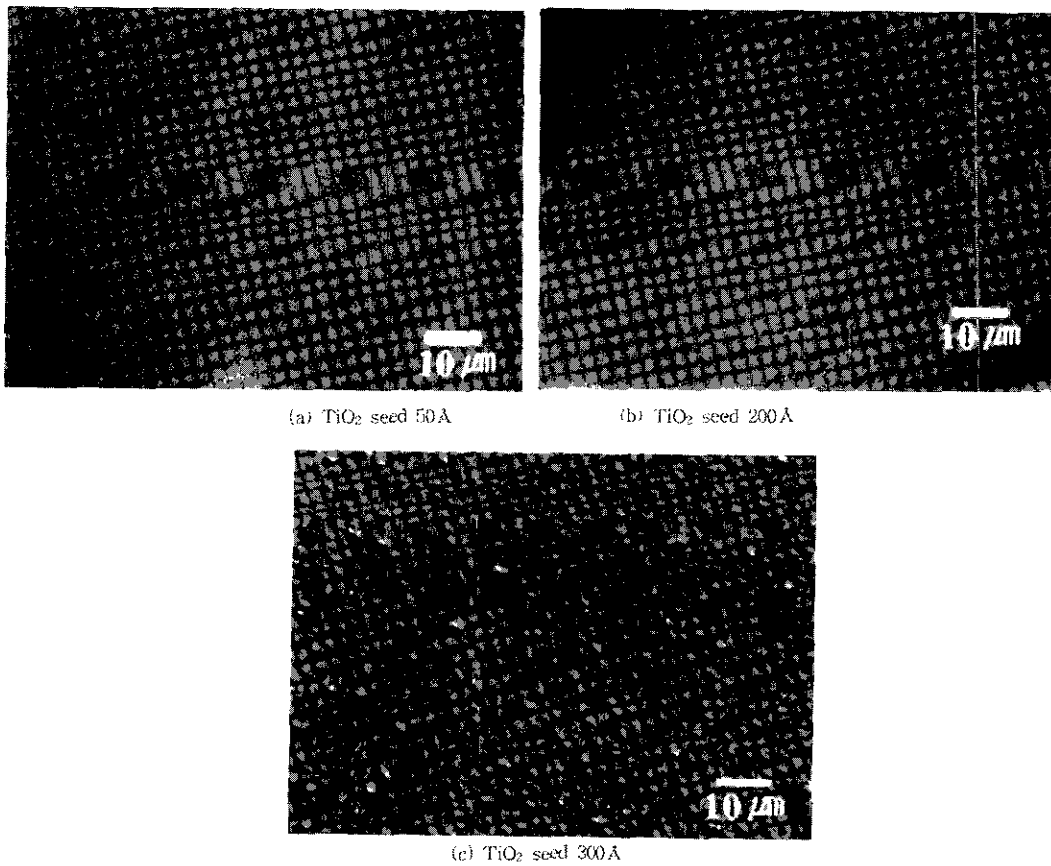


Fig. 3. PZT thin film surfaces on TiO₂ layers with different thicknesses.

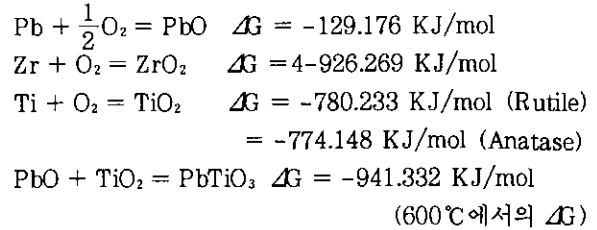
두 전극 위에서 PZT 박막의 표면은 현저한 차이를 보이는 데, 이러한 원인이 전극의 표면 거칠기 차이에서 기인하는 지를 알아보기 위하여 AFM을 통하여 RMS 값을 조사하였다. 그 결과 RMS 값은 Pt의 경우 3.527nm, Ir의 경우 3.717nm로 비슷한 값을 나타내었다. 따라서 이러한 차이는 Pt와 Ir 전극의 표면 거칠기 때문이 아니라, 전극의 물질 특성과 하부전극과의 영향에 의해서 나타난 결과일 것이다.

그림 2는 접착층으로 사용된 TiO₂와 PZT의 반응이 PZT의 결정화 열처리 시에 기여하는 영향을 알아보기 위하여 TiO₂를 계면층으로 인위적으로 삽입하여 실험하였다. 또한, TiO₂ 외에 PZT의 함유물질인 PbO, ZrO₂ 등의 단순 금속산화물이 계면층으로서 기여하는 역할도 비교하였다. PbO, TiO₂, ZrO₂ 등은 산소 분위기에서 reactive sputtering을 통해서 300 Å를 Pt 전극 위에 증착한 후에 PZT 박막의 결정화를 실시하였다. PbO를 seed로 사용한 경우(그림 2-(a))에는 PZT 박막의 perovskite 상을 가진 결정의 밀도는 높지만, 그 크기가 2-3 μm인 rosette 형태의 결정이 형성되었다. 또한, ZrO₂ seed(그림 2-(c))의 경우에도 PZT grain들이 rosette 형태로 성장되었고 결정립 크기는 3-4 μm 정도의 크기로 관찰되었으며, perovskite 상의 밀도도 상대적으로 낮았다. 그러나 TiO₂ seed의 경우(그림 2-(b))에는 rosette 형태의 결정의 성장 없이 아주 미세하게 성장하였으며, 대부분의 영역에서 perovskite 상이 관찰되었다. 이와 같은 결과로 TiO₂가 PbO, ZrO₂ 보다 PZT의 결정화에 긍정적인 방향으로 기여하는 것이 관찰되었다. 따라서 그림 1의 현상은 Pt 전극의 경우 접착층으로 사용한 TiO₂가 열처리 과정을 거치는 동안 하부전극인 Pt의 결정립계를 통해 전극 표면으로 확산해 PZT와 결합하여 PZT의 결정립 크기에 영향을 미치는 반면에 Ir 전극의 경우에는 전극 표면에 수 Å ~ 수십 Å의 얇은 IrO₂ 층의 형성으로 TiO₂의 확산을 방해하여 PZT의 결정화 시에 어떠한 영향도 기여하지 못하여 perovskite 상의 밀도가 낮게 형성된 것으로 판단된다.

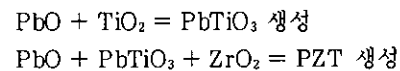
TiO₂의 두께가 PZT 박막에 미치는 영향에 대해서 실험을 하였다. Pt 전극 위에 TiO₂를 50 Å, 200 Å, 300 Å로 두께를 달리하여 증착한 후에 PZT 박막을 형성하여 그 영향을 알아보았다. 그림 3에서와 같이 증착된 TiO₂의 두께가 매우 얇은 50 Å 이상일 경우에도 PZT의 결정이 미세하게 성장하였다. 이와 같은 결과가 나타나는 원인은 박막의 결정화 열처리 시에 PZT precursor에 포함되어있는 PbO 또는 과잉의 PbO가 하부전극 위에 증착된 TiO₂와 서로 결합하여 PT를 형성하고, 형성된 PT가 PZT의 활성화 에너지를 낮추어 주는 역할을 하여 PZT의 핵생성 사이트를 충분히 제공하기 때문에 TiO₂의 양에 따라 PZT의 결정립 크기가 제어된다. 따라서, TiO₂가 없는 경우(ZrO₂ 계면층, PbO 계면층 혹은 TiO₂가 확산하기 어려운 경우)에서는 TiO₂의 양이 증가하면, PbO 또는 과잉의 PbO와 결합하여 PT를 형성할 수 있는 확률이 증가하여 PZT의 결정립 크기가 미세해지는 이유로 설명할 수 있다.

이와 같은 내용을 열역학적인 자료를 이용하여 분석해 보

면²²⁾, sol-gel 방식으로 PZT 박막을 형성할 경우에 PZT precursor의 소결 동안에 용매는 제거되고, 금속의 산화과정을 통하여 단순금속산화물인 PbO, ZrO₂, TiO₂ 등이 먼저 형성하게 될 것이다.



위의 식에서 PbO와 TiO₂는 결정화 과정 동안에 자유에너지 값이 더 낮은 PbTiO₃를 형성하기 적합함을 알 수 있다. Yuhuan Xu에 따르면, 600~650 °C 온도 구간에서는 안정한 PbTiO₃가 다시 PbO와 ZrO₂와 결합하여 PZT를 형성²³⁾할 것으로 예측하였다.



상기와 같은 반응에 의해서 하부전극 위에 증착된 TiO₂는 PZT의 seed인 PT를 형성하여 PZT 박막의 결정화 열처리 시에 결정립 크기를 미세하게 형성시킬 것이다. 그러나 TiO₂가 300 Å 이상(그림 3-(c))의 두께를 갖으면, 비

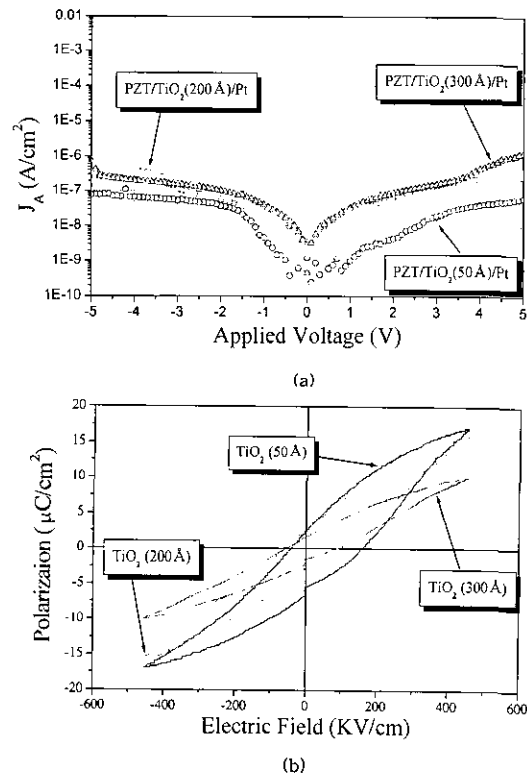
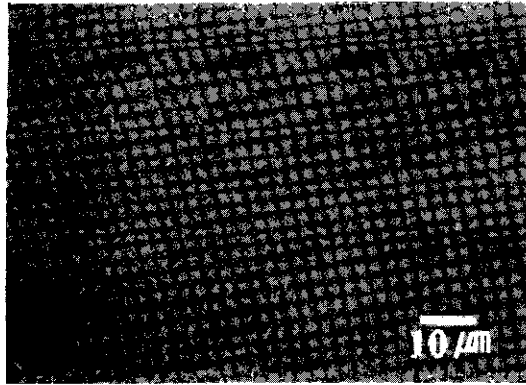
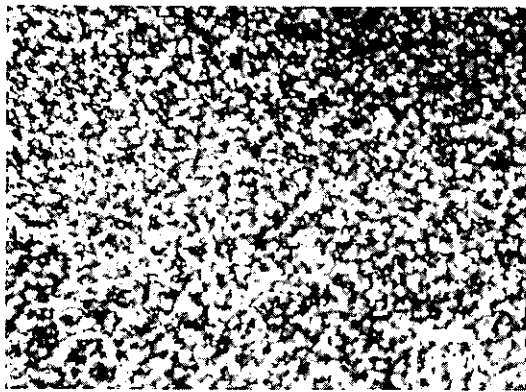


Fig. 4. The leakage current and hysteresis loop of PZT with various TiO₂ thicknesses. (a) Leakage current (b) Hysteresis loop



(a)

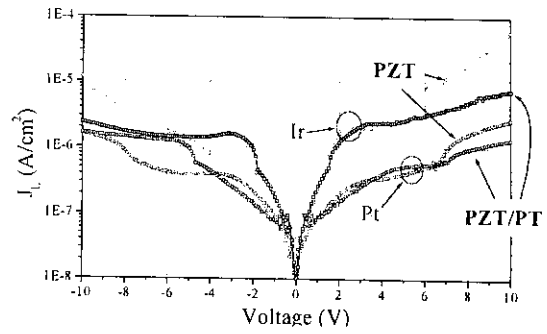


(b)

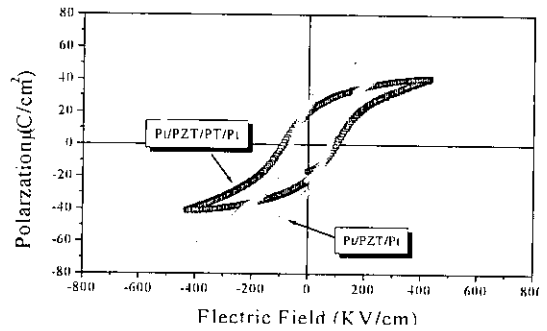
Fig 5. The images of PZT thin films with PT seed layer. (a) PZT/PTseed/Pt (b) PZT/PTseed/Ir

교적 치밀하지 못한 구조를 갖는 TiO₂의 경우 표면이 거칠어져²⁴⁾ 박막의 표면 상태에 나쁜 영향을 주게 되고, 전기적인 측정 결과(그림 4)도 50, 200 Å의 TiO₂ 층을 갖는 경우 보다 강유전 특성이 저하됨을 알 수 있었다. 그 원인은 적절한 량의 TiO₂는 PbO와 결합을 통하여 seed로서 역할을 할 수 있는 반면에 과량으로 존재하는 TiO₂는 PbTiO₃로 변환하는 대신에 TiO₂의 결정상으로 존재하여 강유전체 박막의 특성을 저하시키는 불필요한 계면층이 남게된다. 따라서, TiO₂의 양이 300 Å 이상의 두께를 갖게되면, 결정화 열처리 시에 PbO와 결합하지 않고 TiO₂가 anatase 또는 rutile 상으로 존재²⁴⁾하여 직렬 캐퍼시터 효과에 의하여 전체적인 소자의 특성을 저하시키는 결과를 가져오게 되는 것이다. 그러므로, 증착된 TiO₂ 층 전체가 완전하게 PbO와 반응하여 PT를 형성할 경우에 가장 좋은 특성을 나타낼 수 있기 때문에 증착되는 TiO₂의 두께는 적절한 임계값을 가져야한다.

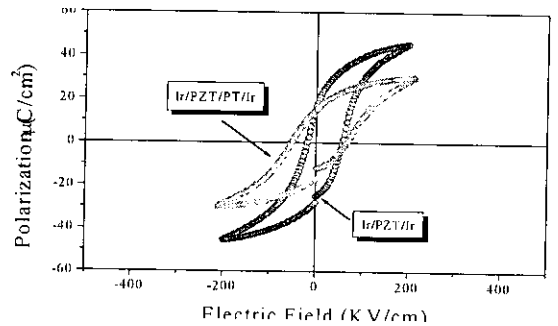
한편으로, PT 계면층이 PZT의 seed로서 결정화에 기여하는 영향을 알아보기 위하여 Pt,Ir/TiO₂/SiO₂/Si기지 위에 PT seed를 sol-gel 방법을 통하여 300 Å을 형성하고, 1차, 2차 소결은 120 °C, 400 °C에서 각각 30분간 실시한 후에 같은 방식으로 PZT를 3000 Å 증착하였다. 결정화 열처리하는 600 °C, 산소 분위기에서 30분간 실시하였다. 그림 5-(a), (b)에서 보는 바와 같이, PT 층을 seed로서 사용한 경우에는 PZT 박막의 결정립 크기가 상당 부분 감소



(a)



(b)



(c)

Fig 6. The leakage current and hysteresis loop of PZT on Pt and Ir Electrodes. (a) Leakage current (b) Hysteresis loop of PZT on Pt (c) Hysteresis loop of PZT on Ir

(150nm) 했음을 관찰할 수 있었다. PT seed 층은 강유전체인 PZT의 결정화 열처리 시에 PZT의 활성화 에너지를 낮추어 주는 역할을 하여 같은 양의 열 에너지로도 많은 핵 생성 자리를 만들어 주기 때문에, 결정립 크기가 감소되었다. 그림 6에서 Pt, Ir 전극을 사용한 시편들의 누설전류는 모두 ±5V에서 J_L가 10⁻⁶A/cm² 정도로 안정한 값을 보여주었으며, seed를 사용한 경우 5V 이상의 높은 전압을 가했을 때, 누설전류가 감소하는 경향을 나타내었다. P-E 이력곡선의 경우 PT seed를 적용했을 때, Pr 값은 변화는 거의 없었다. 그러나 Ec 값은 약간 증가하고, 유전율은 큰 폭으로 감소하였지만, 이는 seed layer로 사용된 PT 층의 큰 Ec 값과 낮은 유전율을 갖는 특징 때문에 소자의 전체적인 특성열화를 가져온 것으로 생각되어진다. 이러한 소자의 열화 현상은 PT 층의 두께를 제어하여 최적의 조건을 확립하면 해결되어질 문제이다. 위와 같은 값을 300 Å의

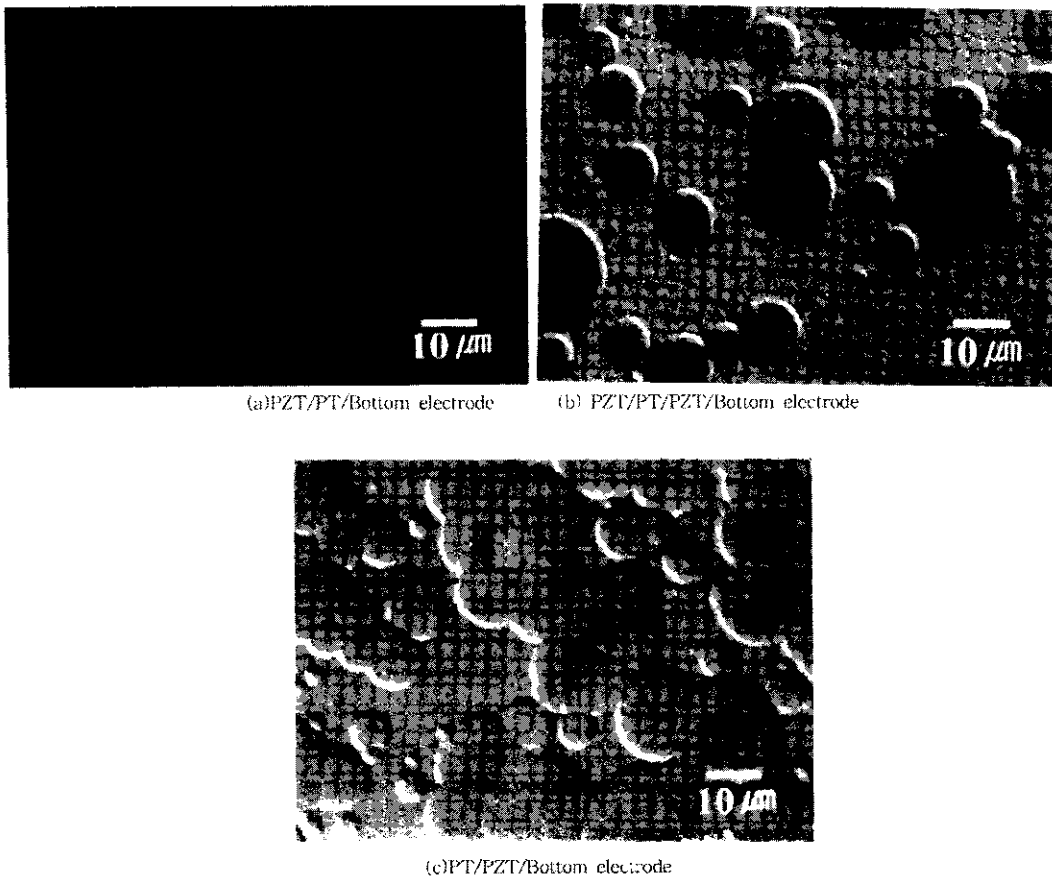


Fig 7. According to the position of PT seed Layer, The images of PZT thin films.

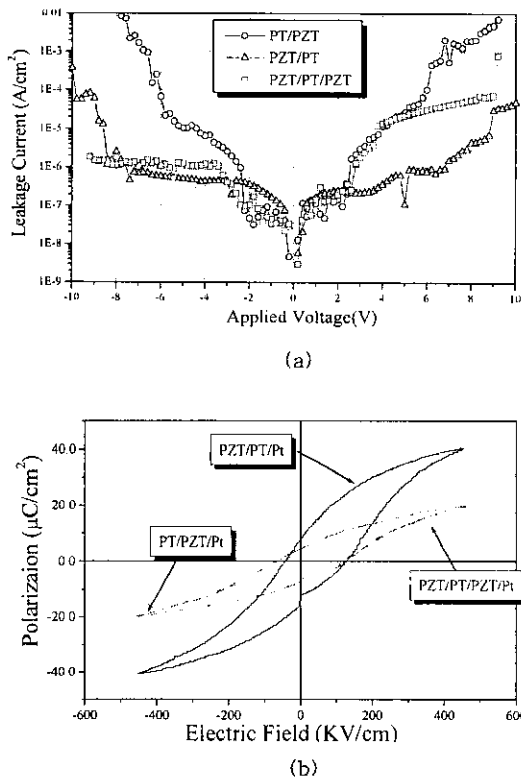


Fig 8. The leakage current and hysteresis loops of PZT with various PT seed positions.

두께를 갖는 TiO₂를 사용한 캐피터와 비교하였을 때, 완전하게 PT (PbTiO₃)를 형성하지 못한 두꺼운 TiO₂ seed 보다는 300 Å의 PT 층을 seed로 사용한 경우가 더 좋은 강유전성을 나타내었다.

핵생성 위치가 PZT 박막에 미치는 영향을 알아보기 위하여 PT seed를 이용하여 다음과 같은 실험을 하였다. (a) PZT (3000 Å)/PT (300 Å)/Pt, (b) PZT (1500 Å)/PT (300 Å)/PZT (1500 Å)/Pt, (c) PT (300 Å)/PZT (3000 Å)/Pt 구조를 제작하여 PZT 박막을 결정화 열처리 실시 후에 Normal-ski 현미경을 통하여 관찰하였다. 그림 7의 (a)는 결정립이 매우 미세하였고, (b)는 전체적인 결정립 크기는 감소하였지만, 부분적으로 rosette이 형태로 성장하였다. (c)는 PT가 seed로서의 역할을 거의 하지 못하고 조대한 rosette 형태의 결정립이 형성되었다. 이는 PZT의 핵 생성 위치가 자유계면이 아니라 PZT 박막과 하부전극 사이의 계면임을 입증하는 것으로서, 박막이 성장할 경우, 자유 계면에너지와 하부전극 계면에너지에 의해서 핵이 생성되어 성장하는데, PT seed를 사용하였을 경우에는 하부전극 계면에너지가 더 주요한 원인으로 작용한 것으로 판단되어진다. 또한 하부전극과 접촉되어 있는 계면의 경우, 하부전극으로 사용된 물질들이 일반적으로 전도성 금속들을 사용함으로써 열에너지가 쉽게 소비되어 핵생성이 쉽게 이루어지므로 하부전극과의 계면이 자유계면보다는 핵

생성에 더 많은 영향을 주는 것으로 생각되어진다. 이는 seed로 사용되는 물질이 PZT의 결정화에 큰 영향을 미치지 않지만, seed의 위치에 의해서 PZT 박막의 표면 상태에 많은 영향이 있음을 보여주는 결과이다. 그림 8은 seed의 위치에 따른 캐퍼시터의 강유전 특성 결과이다. Seed의 위치에 따라 PZT 박막의 결정 형태가 변하게 되므로 누설전류와 P-E 이력곡선의 경우 모두 큰 변화를 볼 수 있었다. 결정립 크기가 제일 작은 PZT/PT 구조가 가장 안정적인 누설전류 값과 강유전 특성을 나타내었다.

4. 결 론

Seed/Pt,Ir/TiO₂/SiO₂/Si 구조 위에 PZT를 sol-gel 방법으로 증착하였다. PT, PbO, TiO₂, ZrO₂ 등 여러 가지 물질을 하부전극과 PZT 층 사이의 계면층으로 사용하여 PZT 특성에 기여하는 계면층의 역할을 조사하였다. 사용된 물질 중에서 PT, TiO₂ 층은 효과적으로 PZT 박막의 결정립 크기를 감소시켰다. PT, TiO₂ 층이 PZT의 결정을 미세하게 성장시키는 원인은 하부전극 위에 증착된 TiO₂가 PZT precursor의 PbO와 반응하여 PZT의 seed인 PT를 형성하고 형성된 PT는 PZT의 결정화 열처리 온도를 감소시켜 더 많은 핵 생성 자리를 제공하여 PZT의 결정립 크기를 미세화시키는 것으로 판단되어진다.

Pt, Ir 전극 위에서 PT를 seed로 사용했을 경우, P-E 이력곡선의 특성은 조금 열화 되었지만, 누설전류 밀도는 10⁻⁶A/cm² 정도의 안정한 값을 가졌으며 높은 전압에서는 누설전류 값이 감소하는 경향을 보였으며, PZT의 결정립 크기도 상당히 감소하였다. 또한, seed의 위치는 자유계면에서가 아니라 PZT 박막과 하부전극 사이의 계면에서 핵생성이 일어난 것을 관찰하였으며 강유전 특성에도 큰 영향을 기여하는 것으로 확인하였다. 이는 PZT의 결정화에 영향을 미치는 요인이 seed의 물질특성 뿐만 아니라, seed의 위치에 대한 영향도 크다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단(과제번호-1NH9826701)의 1998년도 과학기술 기초 중점연구(신소재 분야) 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김지영, 요업기술지, 11 (3), 138, (1996).
- S. Yamaichi, P. Lesaicherre, H. Yamaguchi, K. Takemura, S. Sone, H. Yabuta, K. Miyasaka, M. Yoshida and H. Ono, 1995 IEDM Tech. Digest, **119**, (1995).
- K. Lee, Y. Park, J. Lee, K. Lee, J. Kim, J. Park, B. Roh, B. Kim, D. Ko, C. Hwang, C. Kang, K. Kim, J. Park and J. Lee, 1995 IEDM Tech. Digest, 907, (1996).
- H. Takasu, Integrated Ferroelectrics **14**, 1, (1997).
- R. Jonse, P. Zurcher, P. Chu, D. Taylor, S. Zafar, B. Jiang and S. Gillespie, Integrated Ferroelectrics, **15**, 199, (1997).
- C. de Araujo, J. Scott and G. Taylor, Ferroelectric Thin Film : Synthesis and Basic Properties, Gordon and Breach Publisher, Amsterdam. (1996).
- S.B. Desu and I. K. Yoo, Integrated Ferroelectrics, **3**, 365, (1993).
- I.K. Yoo, S.B. Desu and J. Xing, MRS Symp. Proc., **310**, 165, (1993).
- W.Y. Pan, C.F. Yue and B. A. Tuttle, Ceram. trans, **25**, 385, (1992).
- J.F. Scott and C.A. Paz de Araujo, Science, **246**, 1400, (1989).
- Leo N. Chapin and Sharon A. Myers, Mtr. Res. Soc., 153, (1990).
- C.V. R. Vasant Kumar and M. Sayer, J. Appl. Phys., **71**, 864, (1992).
- J.H. Joo and S.K. Joo, Extended Abs. of the 1995 Int. Conf. on Solid State Device and Materials, Osaka, 5124, (1995).
- Jae-Hyun Joo, You-Jin Lee, Seung-Ki Joo, Ferroelectrics, **196**, 1, 1997.
- Jang-Sik Lee, Eung-Chul Park, Deok-Sin Kil, Kwang-Ho Kim, Byung-il Lee, Seung-Ki Joo, The 3rd international meeting of pacific rim ceramic society (KyungJu), 98. 9. 23, 1998.
- 이장식, 박용철, 이병일, 주승기, 대한금속·재료학회지, **38**, 1, 148, 2000.
- I.K. Yoo, S. B. Desu and J. Xing, Materials Research Society Symposium, **310**, 166, (1993).
- D. M. Smith, Ferroelectrics, 116, 117, (1992).
- R. Waser and M. Klee, Integrated Ferroelectrics **2**, 23, (1992).
- M.V. Raymond, J. Chen, and D.M. Smith, Integrated Ferroelectrics, **83** (12), 7789, (1994).
- J.A. Voigt, B.A. Tuttle, T.J. Headley and D.L. Lamppa, Materials Research Society Symposium Proc. **361**, 395, (1995).
- Ihasan Barin, Thermochemical Data of Pure Substance, VCH Verlags Gesel m.b.h., Weinheim, 1989.
- Y. Xu, Ferroelectric Materials and their Applications, (North-Holland, 1991) Chap. 3, pp114.
- Hyung-Seok Kim, Ilhwan Bang, Jiyoung Kim, "Electrical Properties of MFIS Capacitors with PZT/TiO₂ Layers," J. Kor. Phys. Soc. Vol.35 p. S123 (1999)