

Pb(Zr, Ti)O₃ 강유전체 박막의 스퍼터링 증착과 후속열처리

장지근 · 박재영 · 윤진모 · 임성규 · 장호정

단국대학교 전자공학과
(1996년 7월 12일 접수)

Sputtering deposition and post-annealing of Pb(Zr, Ti)O₃ ferroelectric thin films

G. K. Chang, J. Y. Park, J. M. Yoon, S. K. Lim and H. J. Chang

Dept. of Electronics Eng., Dankook Univ., Cheonan 330-714, Korea
(Received July 12, 1996)

요 약 - Pt/Ti/SiO₂/Si 기판상에 고주파 마그네트론 스퍼터링 방식으로 PZT 박막[두께: 3000Å]을 증착하고 RTA 방식으로 후속 열처리[열처리온도: 550°C ~ 650°C, 열처리 시간: 10초 ~ 50초]를 실시하여 직경 0.2 mm 소자의 FECAPS(ferroelectric capacitors)를 제작하였다. 제작된 커패시터의 유전상수(ϵ_r)와 잔류분극(2P_r)은 650°C로 30초간 열처리한 시편에서 $\epsilon_r(1\text{kHz}) = 690$, 2P_r(-5V ~ 5V sweep) = 22 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 로 가장 높게 나타났으며 유전 정접(tan δ)과 누설전류(J_s)는 600°C에서 30초간 열처리한 시편에서 tan $\delta(\geq 10\text{kHz}) \leq 0.02$, J_s(5V) = 3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 로 가장 낮게 나타났다.

Abstract - FECAPS(ferroelectric capacitors) have been fabricated by RF magnetron sputtering deposition of 3000Å PZT thin films on the Pt/Ti/SiO₂/Si substrates and post-annealing with the temperature of 550°C ~ 650°C for 10 sec ~ 50 sec in a RTA system. The electrical characteristics of the fabricated capacitors showed the highest dielectric constant and remanent polarization [$\epsilon_r(1\text{kHz}) = 690$, 2P_r(-5V ~ 5V sweep) = 22 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$] in the samples annealed at 650°C for 30 sec, while the lowest tangent loss and leakage current [tan $\delta(\geq 10\text{kHz}) \leq 0.02$, J_s(5V) = 3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$] in the samples annealed at 600°C for 30 sec.

1. 서 론

Perovskite 결정구조를 갖는 PbTiO₃, (Pb, Zr)TiO₃와 같은 Pb계 강유전체 박막은 높은 유전상수와 P-E 이력 현상에 의한 가역자발 분극의 스위칭 특성으로 DRAM 커패시터와^[1-3] non-volatile ferroelectric RAM (NVRAM)등 메모리 소자에^[4-6] 응용 연구가 진행되고 있다. 특히 PZT는 256M DRAM급 이상의 차세대 반도체 소자의 capacitor를 제작할 경우 SiO₂나 Si₃N₄를 대체할 수 있는 적합한 재료로 알려져 있으며, 재료특성이 조성에 따라 다소 차이가 있지만 박막형태로도 비교적 높은 유전상수($\sim 10^3$)와 큐리온도(230 ~ 490°C) 특성을 나타내고 있다^[7]. 그러나 Pb의 휘발성이 크기 때문에 PZT박막을 고온에서 형성할때 필연적으로 수

반되는 Pb 결핍으로 박막의 조성이 불균일 하게 나타나고, 기판과의 계면반응으로 인한 특성저하가 문제점으로 제기되고 있다^[8]. 지금까지 스퍼터링 방식으로 Si 기판상에 PZT박막을 형성한 논문들은 다수 발표되었으나^[9,10] 박막증착후 후속열처리 조건에 따른 결정학적, 전기적 특성을 자세히 분석한 연구는 거의 찾아볼 수 없는 실정이다.

본 연구에서는 Pt/Ti/SiO₂/Si 구조를 갖는 기판상에 PZT박막을 스퍼터링 증착하고 RTA(rapid thermal annealing) 방식으로 후속 열처리를 실시하여 FECAPS를 제작할때 열처리조건(온도와 시간)에 따른 커패시터 소자의 결정학적, 전기적 특성을 분석하였으며 이를 통해 PZT박막의 후속열처리에 대한 최적공정을 알아보았다.

2. 실험방법

2.1 시편제작

PZT 박막을 페롭스카이트 결정 구조로 형성하기 위해서는 적절한 하부 전극의 선택과 배향장장이 특히 중요하며, 하부 전극의 조건으로는 낮은 전기저항과 높은 열화학적 안정성 그리고 기판과 유전체와의 격자 정합을 들 수 있다. Pt는 이러한 요구 조건에 적합한 재료이며 Pt(111)/sapphire(0001)기판인 경우 능면정 PZT와 5% 이내에서 격자 정합을 이루게 된다¹¹⁾.

그러나 Pt 금속을 Si 기판위에 직접 증착할 경우 기판과 하부 전극간의 weak adhesion 및 계면반응 등의 문제점이 발생될 수 있으므로 Si 기판을 사용할 경우 기판과 하부전극간에 계면반응 보호층(SiO₂) 및 Pt 하부전극의 adhesion 개선을 위한 중간 버퍼층(Ti)의 삽입이 필요하다. 본 실험에서는 p-type(100) Si 웨이퍼($\rho = 1 \sim 10 \Omega\text{cm}$)상에 산화법(T = 1000°C, dry O₂/wet O₂)으로 약 2500Å의 SiO₂ 산화막층을 형성한후, Pt 하부 전극과 기판과의 접착성 및 격자 정합을 개선하기 위해 중간층(buffer layer)으로 SiO₂/Si 구조 위에 Ti막을 DC 마그네트론 스퍼터링 장치에서 약 250Å의 두께로 증착하였다.

Ti/SiO₂/Si 기판위에 다시 DC 마그네트론 스퍼터링 방법으로 Pt 하부전극을 약 2500Å 두께로 증착하였다. 이후 Pt 전극막의 결정 특성이 PZT 박막의 결정 성장에 영향을 미칠 것으로 판단되어, Pt 박막의 결정성 개선을 위해 450°C의 온도에서 진공 분위기로(~10⁻⁴ Torr) 10분간 열처리를 실시하였다.

제작된 Pt/Ti/SiO₂/Si의 기판상에 RF 마그네트론 스퍼터링 방법으로 450°C의 기판온도에서 약 3000Å 두께의 PZT 박막을 증착하였다. 실험에 사용된 타겟은 Pb(Zr_{0.4}Ti_{0.6})O₃ + PbO(20 mole%)의 조성을 갖는 3인치 크기의 고순도 제품이며, 타겟에 20 mole%의 excess PbO를 첨가한 것은 고온 열처리시 발생하는 Pb 성분의 휘발을 보상하여 증착된 박막이 stoichiometry 조성을 갖추도록 하기 위해서이다.

스퍼터링 장비의 기판온도를 저항식 발열체로 가열하였으며 PZT 박막 증착시 스퍼터링 가스의 주입을 mass flow controller를 통해 조절하였다.

표 1에서는 Pt/Ti 및 PZT 박막의 스퍼터링 조건을 요약하였다.

PZT 박막을 증착한 후 perovskite 안정상을 얻기위해 RTA(rapid thermal annealing) 장치에서 후속열처리를 실

표 1. Pt/Ti 및 PZT 박막의 스퍼터링조건

Sputtered Films	Pt/Ti	PZT
Power (Watt)	200(DC)	120(RF)
Gas Pressure (Torr)	2×10^{-2}	1×10^{-2}
Sputtering Gas	Ar	Ar + O ₂ (10%)
Depo. Rate (Å/sec)	~1.0	~0.5
Subst. Temp. (°C)	room	450
Thickness (Å)	2500/250	3000

표 2. PZT 박막의 RTA 후속열처리 조건

Annealing Temp. [°C]	550, 600, 650
Annealing Temp. [sec]	10, 30, 50
Ambient Gas	O ₂
Pressure [atm]	10 ⁻¹
Rising Time [sec]	55~75
Cooling	natural

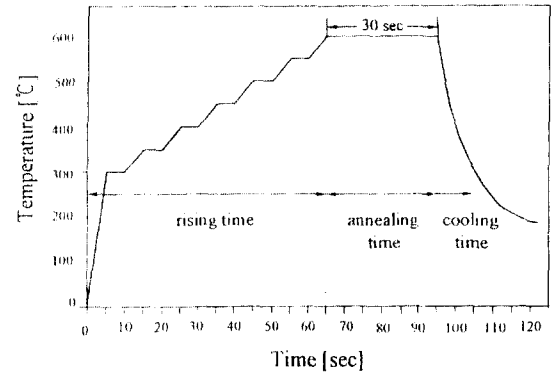


그림 1. RTA방식에 의한 후속열처리 과정.

시하였다. 후속열처리의 온도와 시간에 따른 결정상의 형성을 알아보기 위해 RTA온도를 550°C~650°C의 범위로, RTA시간을 10 sec ~ 50 sec로 변화시켜가며 산소 분위기(압력: 10⁻¹ atm)에서 PZT 박막을 열처리 하였다.

표 2에서는 PZT 박막의 RTA 후속열처리 공정을 요약하였으며, 그림 1에서는 열처리 온도와 시간을 steady state로 정의했을때 (600°C에서 30초간 열처리 할 경우)의 온도 가열법을 나타내었다. 후속 열처리시 정상상태 까지 온도의 점진적 상승은 다층 박막구조에서 박막간의 열팽창계수의 차이에 의한 thermal stress 및 crack의 발생을 방지하기 위함이며 열처리가 완료된 후에는 시료를 진공상태에서 자연 냉각시켰다.

시편제작의 마지막 단계로 vacuum evaporator 장치(진공도: 1×10⁻⁶ Torr)에서 약 0.5µm 두께의 Al 금속을

증착하였으며 metal shadow mask를 사용하여 약 0.2 mm 직경의 커패시터 상부전극을 형성하였다.

2.2 측정

제작된 하부전극과 PZT 박막의 열처리조건에 따른 결정화 여부와 결정상의 변화 과정을 규명하기 위해 X-ray diffraction (XRD) 분석을 실시하였다. 실험에 이용된 XRD 장비는 Rigaku 사의 RAD-C model (X-ray source: Cu K α monochromatic radiation) 이며, 측정시 2 θ 의 범위를 15°~70°, scan speed를 6°/min 로 조정하였다. PZT 박막의 깊이에 따른 원소의 분포(depth profile)를 AES (Auger Electron Spectroscopy)로 분석하여 각 성분 원소들의 깊이에 따른 분포상태의 변화를 알아보았으며, EDX (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) 분석을 통해 PZT 박막의 표면성분을 조사하였다. mechanical stylus profilometer (α -step)로 박막의 두께를 측정하였으며 이를 SEM (Scanning Electron Microscopy) 단면사진으로 확인하였다. 또한 SEM 사진을 통해 열처리 조건에 따른 PZT 박막의 표면형상을 관찰하였다.

semiconductor parameter analyzer(HP 4145B)를 사용

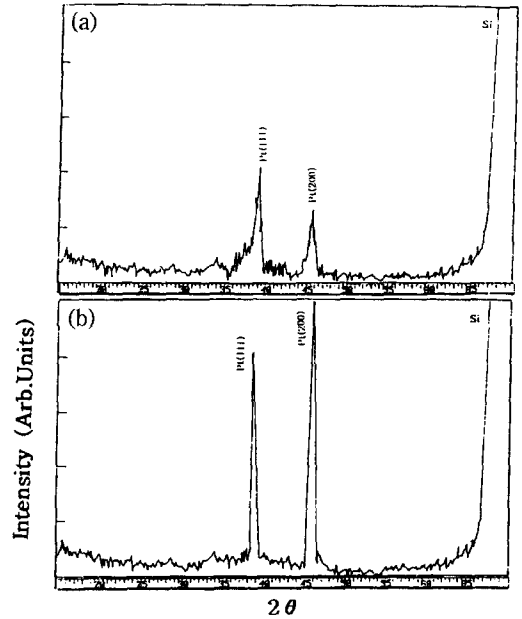


그림 2. Pt/Ti/SiO₂/Si 하부구조를 (a) 열처리 하지않은, (b) 진공상태에서 10분간 450°C로 열처리한 시편의 XRD 분석.

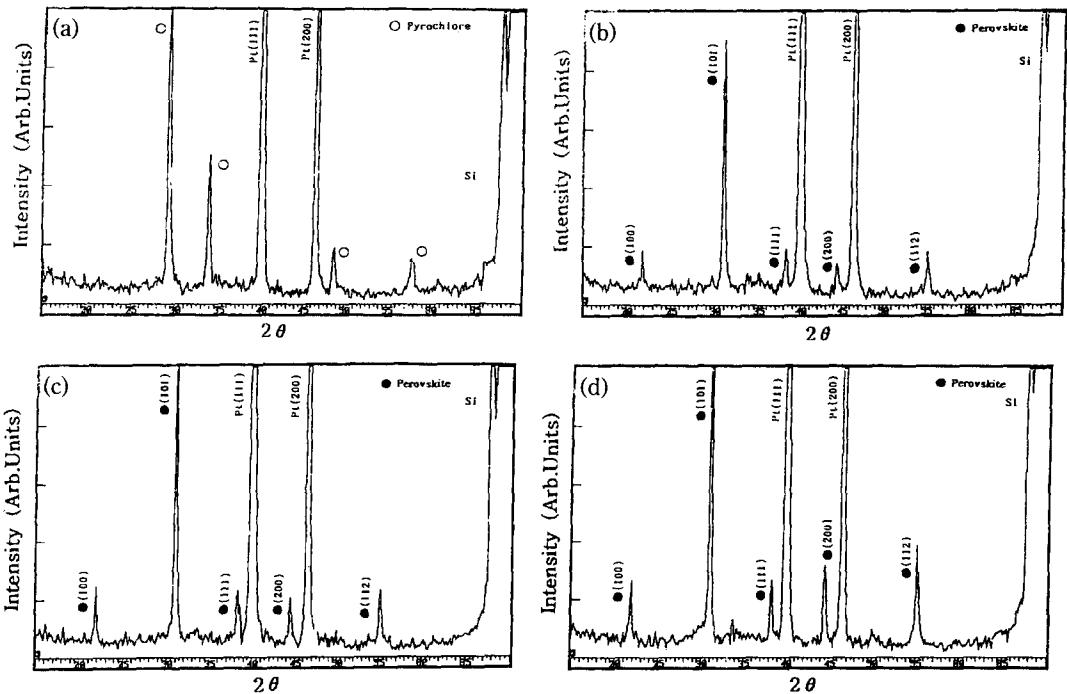


그림 3. (a) as-deposited, (b) 550°C, (c) 600°C, 및 (d) 650°C의 온도에서 30초간 후속열처리한 시편의 XRD 분석.

하여 전류-전압 특성을 측정하였고 impedance analyzer (HP 4280/4192A)를 사용하여 상온에서 주파수에 따른 유전상수(ϵ') 및 유전 정접($\tan \delta$)를 zero bias에서 측정하였다. 제작된 PZT박막의 잔류분극(2P_r) 특성을 알아보기 위해 Sawyer-Tower 회로가 내장된 RT66A 장비를 이용하여 60Hz 주파수에서 PZT 커패시터의 P-E 이력곡선을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

그림 2는 Ti/SiO₂/Si 구조 위에 Pt 하부금속을 상온에서 증착한 후 열처리 전후의 XRD 분석을 실시한 결과이다. 그림 2(a)는 열처리 하지 않은 시편의 경우이고, 그림 2(b)는 증착 후 vacuum chamber 내에서 450°C로 10분간 열처리한 시편의 XRD 분석이다.

하부전극층인 Pt 박막의 결정특성은 열처리 하지 않은 시편의 경우 Pt 결정상의 peak가 약하게 나타나고 있다. 열처리된 시편의 경우 Pt(111) 및 Pt(200) 곡선이 매우 강하게 나타남을 볼 수 있다. 이는 증착된 Pt 박막층이 낮은 증착온도에 의해 거의 비정질상에 가까운 결정구조를 나타내지만 이를 열처리함으로써 Pt 박막층의 결정 특성이 Pt(111) 및 Pt(200) 방향으로 성장됨을 알 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 Pt/Ti/SiO₂/Si 하부구조를 진공상태에서 450°C로 10분간 열처리한후 PZT 박막을 증착하였다.

그림 3에서는 3000Å 두께로 증착된 PZT 박막에 대해 as-deposited 및 550°C, 600°C, 650°C의 온도에서 30초간 후속열처리한 시편의 X선 회절곡선을 보여주고 있다.

as-deposited 박막에 대해서는 낮은 증착온도로 인해 준안정상인 Pb-rich의 pyrochlore 상이 지배적으로 나타남을 볼 수 있으나 550°C 650°C 범위에서 30초간 열처리한 시편들의 경우 pyrochlore 상은 없어지고 대신 안정상인 perovskite 결정상만이 나타나고 있다.

열처리 온도가 550°C에서 600°C 및 650°C로 증가될 경우 X선 peak의 강도는 다소 증가하는 경향을 보이고 있으며, FWHM (full width at half maximum) 값은 0.25°의 양호한 결정특성을 나타내고 있다.

그림 4는 600°C의 온도에서 후속열처리 시간(10 sec, 30 sec, 50 sec)을 변화시켰을 때의 X선 회절곡선이다. 열처리 온도가 600°C일 때 열처리 시간이 10초에서 30초로 길어짐에 따라 PZT 결정의 X선 peak 강도는 다소 증가하나, 열처리 시간이 30초에서 50초로 길어짐에

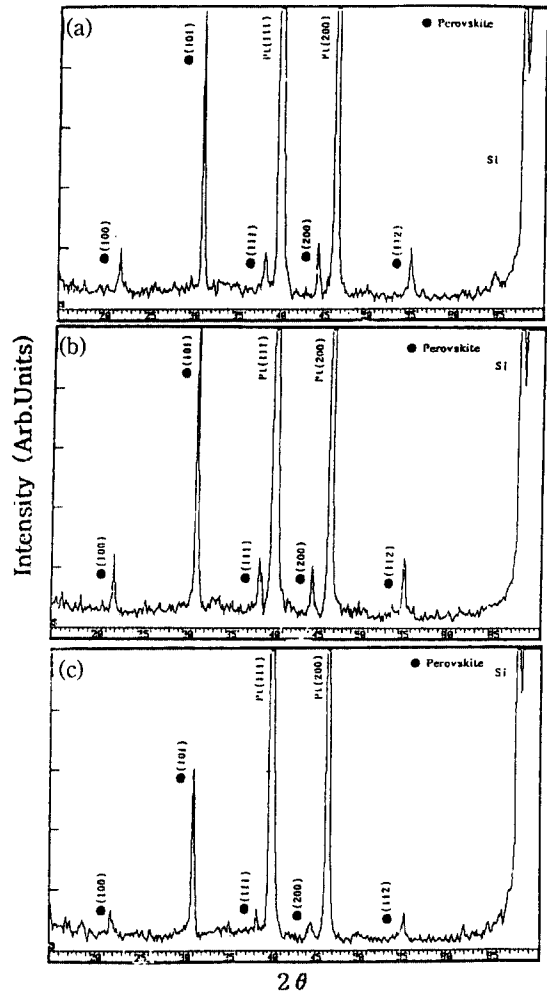


그림 4. 600°C의 온도에서 (a) 10 sec, (b) 30 sec, 및 (c) 50 sec간 후속열처리한 시편의 XRD 분석.

따라 X선 회절곡선의 결정 peak는 전반적으로 크게 감소되어 나타나고 있다.

PZT박막을 고온에서 장시간 후속열처리 한 경우, Pb의 휘발에 의한 PZT박막의 조성 불균일과 다층구조에서 열팽창계수의 차이에 의한 thermal stress의 발생 및 계면반응등으로 인해 결정특성이 나빠지게 된다. 따라서 안정된 perovskite 결정상을 얻을 수 있는 조건아래 가급적 낮은 온도에서 짧은시간 동안 열처리를 실시하는 것이 바람직하다. 이러한 사실을 고려하고 XRD 분석 결과를 종합하면, 후속 열처리를 통해 강유전성 PZT 박막을 제작할 때, 600°C 650°C의 온도범위에서 약 30초간 RTA 열처리를 실시하는 것이 적절하다고 판단된다.

그림 5는 Pt/Ti/SiO₂/Si 기판상에 PZT 박막을 증착하고 600°C의 온도에서 30초간 후속 열처리한 시편의 SEM 단면사진을 보여주고 있다.

SEM 단면사진을 통해 증착된 박막의 두께를 측정할 결과, PZT 박막의 두께는 약 3000Å 정도로 나타나고 Pt + Ti 금속층의 두께는 2700~2800Å 정도로 나타나 증착된 박막이 비교적 균일하게 성장되었음을 확인할 수 있었다.

그림 6에서는 증착된 PZT 박막에 대해 as-deposited 및 600°C의 온도에서 30초간 열처리한 시편의 SEM 표면사진을 보여주고 있다.

표면 SEM사진을 살펴보면 as-deposited 박막에 대해서는 표면형상이 비교적 매끈하고 박막결함이 발생하지 않으나, 600°C로 열처리를 실시한 박막에 대해서는 표면에 crack이 생기고 박막의 치밀성이 결여되어 있음을



그림 5. 시편의 SEM 단면사진.

볼 수 있다.

후속열처리시 PZT 박막에 결함이 발생하는 것은 하부구조와 열 팽창계수의 차이로 생기는 열응력 때문으로 판단된다.

그림 7에서는 as-deposited 시편과 600°C에서 30초간 열처리한 시편의 깊이에 따른 AES 성분분석을 보여주고 있다. 이를 통해 PZT 박막내의 각 성분원소가 깊이에 따라 비교적 균일하게 분포되어 있고 Pt층 역시 PZT 층과 상호반응 없이 비교적 안정된 막을 형성하고

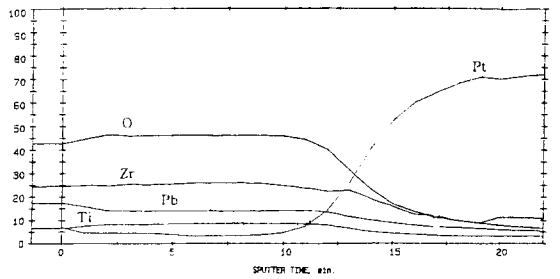
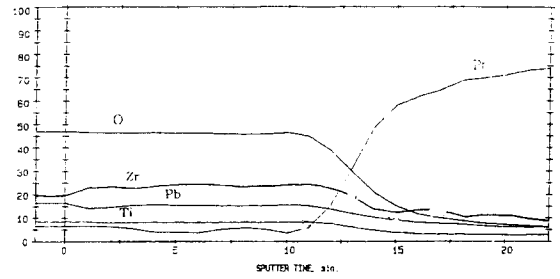


그림 7. (a) as-deposited 및 (b) 600°C에서 30초간 열처리한 시편의 AES 성분분석.

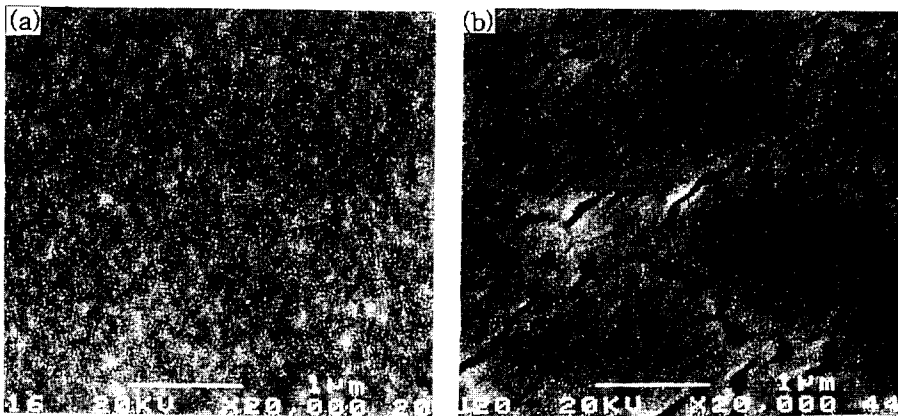


그림 6. (a) as-deposited (b) 600°C의 온도에서 30초간 후속열처리한 PZT 박막의 SEM 표면사진.

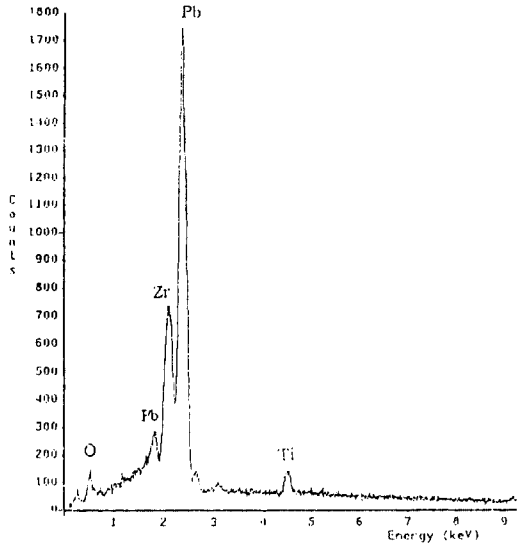


그림 8. 600°C에서 30초간 열처리한 PZT 박막의 표면성분에 대한 EDX 분석.

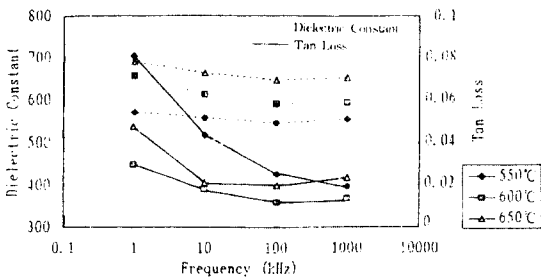


그림 9. 550°C, 600°C, 및 650°C에서 30초간 후속열처리한 시편에 대한 주파수에 따른 유전상수(ϵ_r)와 유전정접($\tan \delta$)의 변화.

있음을 볼 수 있다.

그림 8은 600°C의 온도에서 30초간 열처리한 PZT 박막의 표면성분 원소들에 대한 EDX 분석을 실시한 결과이며 EDX 성분분석 결과 시편의 표면 박막에서는 조성에 필요한 성분 원소들만 나타나고 있음을 관찰할 수 있다.

그림 9는 550°C, 600°C 및 650°C의 온도에서 30초간 열처리한 PZT 박막에 대해 상온 부근에서 주파수(100Hz~1MHz 범위)에 따른 유전상수(ϵ_r)와 유전정접($\tan \delta$)의 변화를 보여주고 있다. 온도가 550°C에서 650°C로 증가함에 따라 유전상수의 값은 측정 주파수 범위에 걸쳐 전반적으로 증가하고 있다.

열처리온도가 550°C에서 650°C로 증가함에 따라

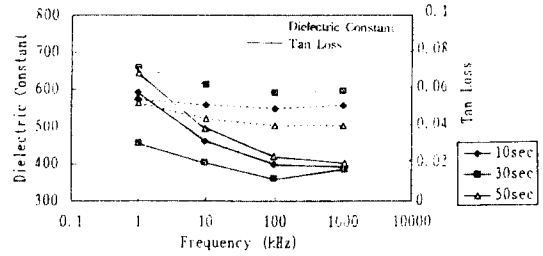


그림 10. 후속열처리(열처리온도: 600°C)의 시간에 따른 비유전상수와 유전정접.

1KHz 주파수에서 유전상수는 570에서 690으로 약 20% 증가되었다. 또한 600°C 온도에서 30초간 열처리된 PZT 박막의 경우 1KHz 및 1MHz 주파수에서 각각 640과 590을 나타내어 주파수 증가에 따라 유전상수는 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 높은 주파수에서 유전상수의 감소는 주파수 분산효과에 의한 것으로 전극과 입계에 관련된 직렬저항에 기인하는 것으로 알려져 있다^[12]. 주파수에 따른 유전정접의 변화는 열처리온도가 550°C에서 650°C로 증가함에 따라 1KHz 주파수에서 0.08에서 0.05으로 감소되었고, 600°C 온도에서 $\tan \delta$ 값은 약 0.03으로서 가장 작은 값을 나타내었다. 또한 600°C에서 30초간 열처리한 시료의 경우 주파수가 1KHz에서 100KHz로 증가함에 따라 $\tan \delta$ 값은 0.03에서 0.01로 작아지는 경향을 나타내었다.

그림 10에서는 600°C의 온도에서 10초, 30초, 50초간 후속열처리한 박막시편의 주파수에 따른 유전상수와 유전정접의 변화를 나타내었다. 600°C 온도에서 열처리 시간이 30초인 경우가 10초와 50초동안 열처리한 박막 시편에 비해 높은 유전상수와 낮은 유전정접 특성 나타내었으며, 50초간 장시간 열처리된 박막시편의 경우가 측정주파수 범위에 걸쳐 가장 낮은 유전상수($\epsilon_r = 500 \sim 560$)와 높은 유전정접($\tan \delta = 0.02 \sim 0.07$)의 값을 나타내었다.

그림 11은 550°C, 600°C 및 650°C 온도에서 30초간 열처리한 시편의 P-E 이력곡선을 보여주고 있다. 이들 그림은 RT66A 장비에 의해 sweep 전압을 $\pm 5V$ 로 변화시켜 상온에서 60Hz 주파수로 측정한 결과이며 그림상의 P-E 이력곡선은 전형적인 강유전체의 특성을 나타내고 있다. 본실험에서 제작된 시편의 PZT박막은 열처리 온도가 550°C에서 650°C로 증가함에 따라 잔류분극($2P_r$)이 $4 \mu C/cm^2$ 에서 $22 \mu C/cm^2$ 으로 항전계($2E_c$)는 95 KV/cm에서 190 KV/cm로 증가되었으며 열처리 온도가 600°C일

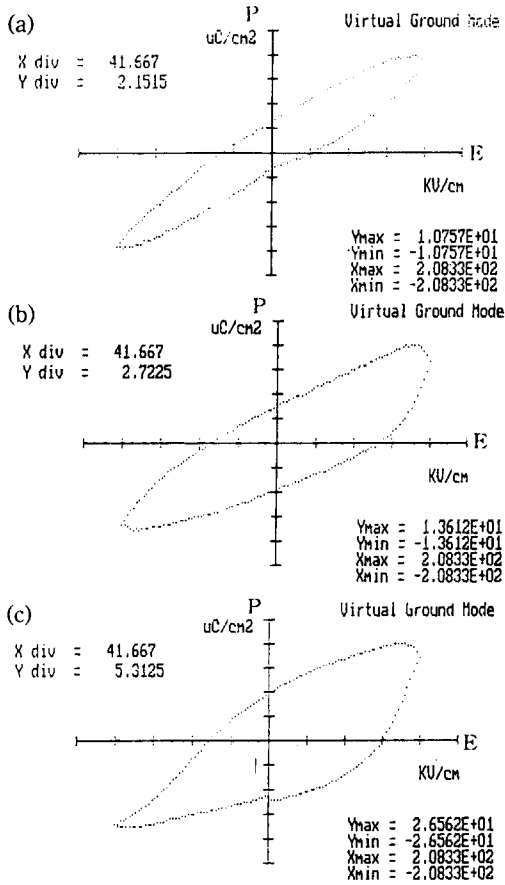


그림 11. (a) 550°C, (b) 600°C, 및 (c) 650°C에서 30초간 후속 열처리한 시편에 대한 P-E 이력곡선.

때 잔류분극과 항전계는 각각 $10 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 과 $180 \text{KV}/\text{cm}$ 로 나타났다.

그림 12에서는 PZT 박막을 550°C, 600°C 및 650°C 온도로 30초간 후속열처리한 시편의 전류-전압 특성곡선을 나타내었다.

600°C로 열처리된 시편의 경우 5V의 bias 전압에서 측정된 전류는(소자면적: $3.14 \times 10^{-4} \text{cm}^2$) 약 $3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 로 나타났으며, 550°C 및 650°C에서 열처리된 시편들에 비해 양호한 누설전류 특성을 보이고 있다. 실험에서 얻어진 PZT 박막은 소자활용(메모리 커패시터등) 관점에서 다소 높은 누설전류 특성을 보이고 있는데, 이는 SEM 표면사진에서 볼 수 있듯이 균열(crack)이나 pin hole과 같은 박막결함의 존재에 기인하는 것으로 사려된다.

PZT 박막으로부터 우수한 전기적 특성의 FECAPs를

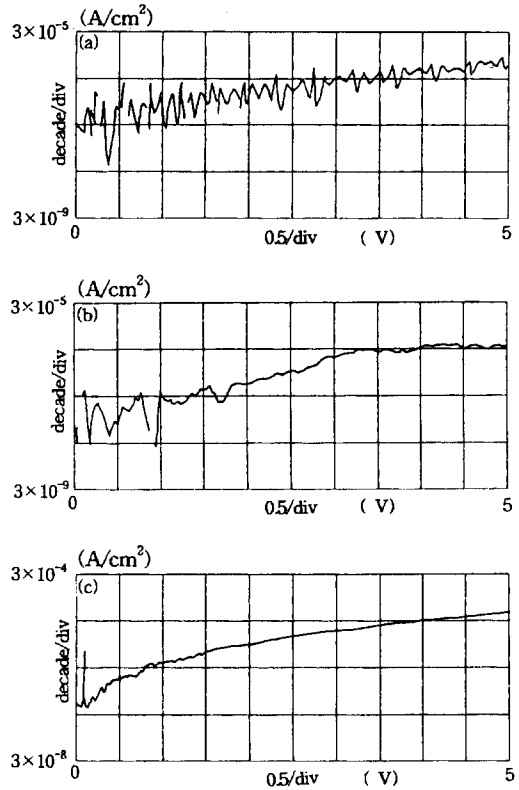


그림 12. (a) 550°C (b) 600°C (c) 650°C에서 30초간 후속 열처리한 시편의 전류-전압 특성.

제작하기 위해서는 기본적으로 높은 유전상수와 잔류분극이 그리고 낮은 유전정점과 누설전류 특성이 요구되며, 이들 전기적 특성들은 전극의 구조, 박막의 결정 상태 및 결함등에 영향을 받게된다. 본 실험에서는 600°C 650°C의 온도범위로 30초간 후속 열처리를 실시한 경우에 비교적 양호한 PZT 박막 커패시터의 전기적 특성을 얻을 수 있었으며 유전상수와 잔류분극은 650°C로 30초간 열처리한 시편에서, 유전정점과 누설전류는 600°C에서 30초간 열처리한 시편에서 가장 양호하게 나타났다.

4. 결 론

Ti/SiO₂/Si 기판상에 상온에서 Pt 박막을 증착한 후 약 450°C 온도로 10분간 in-situ 열처리한 결과 Pt 전극은 (111) 및 (200) 방향으로 배향 성장되었고, 표면형상은 결함의 발생없이 비교적 매끄러운 상태를 나타내었다. Pt/

Ti/SiO₂/Si 기판위에 증착된 as-deposited PZT 박막의 경우 준안정상인 pyrochlore 결정상이 지배적으로 나타났으나 이들 PZT 박막을 550°C~650°C의 온도범위로 30초간 후속 열처리한 결과 perovskite 안정상을 얻을 수 있었다.

SEM 사진을 통해 후속 열처리된 PZT 박막의 표면형상을 관찰해본 결과 crack과 같은 박막결함이 존재하였으며 치밀하지 못한 표면형상을 보여주었다.

박막내의 성분원소들은 깊이에 따라 비교적 균일하게 분포되어 있고 Pt층과 PZT층은 상호반응 없이 안정된 경계면을 형성하고 있음을 AES분석을 통해 확인할 수 있었다.

PZT 박막의 열처리온도를 550°C에서 650°C로 증가시킬 경우[열처리 시간: 30초] 1kHz 주파수에서 유전상수(ϵ_r)는 570에서 690으로 증가하였으며 잔류분극(2P_r)은 4 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 에서 22 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 으로, 항전계(2E_c)는 95 kV/cm에서 190 kV/cm로 각각 증가하였다.

600°C에서 30초간 열처리한 PZT 박막의 경우 잔류분극과 항전계는 각각 10 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 과 180 kV/cm를 나타냈으며 유전정접은 10kHz 이상의 주파수에서 0.02 이하로 나타났다. 또한 5V 바이어스 전압에서 측정된 누설전류는 3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 로 나타났으며, 550°C 및 650°C에서 열처리한 시편에 비해 다소 양호한 누설전류 특성을 나타내었다.

참고문헌

1. S.K. Dey and J.J. Lee, *IEEE Trans. Electron Devices*, **39**, 1607 (1992).
2. Reza Moazzami and Chenming Hu, *IEEE Trans. Electron Devices*, **39**, 2044 (1992).
3. Jiyoung Kim, Rajesh Khamankar, C.Sudhama, et al., *IEEE Symposium on VLSI Technology Digest of Technical Papers*, 151 (1994).
4. Y. Yamauchi, et al., *IEDM Proceedings*, 417 (1988).
5. Y. Terada, *IEEE Journal of Solid State Circuits*, **23**(11), 86 (1988).
6. S. Sinharoy, et al. *J. Vac. Sci. Technol. A.*, **10**(4), 1554 (1992).
7. Yuhan Xu, *Ferroelectric Materials and Their Applications*, Elsevier Science Publishers, 109 (1991).
8. Kazuhide Abe, Hiroshi Toyoda, Motomasa Imai and Yukari Yokote, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30**(9B), 2152 (1991).
9. M. Shimizu and T. Shiosaki, *Integrated Ferroelectrics*, **5**, 255 (1994).
10. T. Hase, K. Hirata, K. Amanuma, N. Hosokawa and Y. Miyasaka, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**(9B), 5244 (1994).
11. Takeshi Okamura, Masatoshi Adachi, Tadashi Shiosaki and Akira Kawabata, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30**(5), 1034 (1991).
12. M. Sayer, A. Mansingh. and A. K. Arora, *Integrated Ferroelectrics*, **1**, 129 (1992).