

초고집적반도체의 커패시터용 강유전 박막의 전기적 특성 개선

마재평* · 박삼규
호남대학교 전자공학과

Improvement of Electrical Property in Ferroelectric Thin Films for ULSI's Capacitor

Jae-Pyung Mah* and Sam-Gyu Park

Department of Electronic Engineering, Honam University, Seobong-dong,
Gwangsan-gu, Gwangju 506-090, Korea

초 목: PZT 박막을 rf-마그네트론 스퍼터링으로 Pt/Ti/SiO₂/Si 기판 위에 형성시켰다. 5% 과잉 PbO를 포함한 bulk PZT 타겟을 사용하였다. 상온에서 PZT 박막을 얇게 입힌 후 나머지 두께를 650°C에서 in-situ 방법으로 형성시켰다. 강유전 특성을 갖는 PZT 상은 650°C에서 형성되었다. 2단계 스퍼터링에 의해 누설전류 특성을 크게 증진시킬 수 있었고, 적절한 두께의 상온층을 포함시킨 경우 2×10⁻⁷A/cm²의 매우 작은 누설전류를 나타냈다. 누설전류 기구에 대한 조사 결과, 여러 조건에서 제조된 PZT 박막의 전기 전도는 모두 bulk-limit 기구에 의한 것임을 알 수 있었다.

Abstract: PZT thin films were formed by rf-magnetron sputtering on Pt/Ti/SiO₂/Si substrate. Bulk-PZT target containing 5%-excess PbO was used. After PZT thin films had been deposited at room temperature, remaining portion of the thin film was formed by in-situ process. The ferroelectric perovskite phase was formed at 650°C. The leakage current property was improved dramatically by 2-step sputtering, and in the sample containing optimum thickness of room temp.-layer very low leakage current of 2×10⁻⁷A/cm² was shown. As a result of the investigation on the leakage current mechanism, the electrical conduction mechanism in all PZT thin films formed by several conditions was confirmed as bulk-limited mechanism.

Keywords: PZT, ferroelectric, leakage current, 2-step sputtering, conduction mechanism

1. 서 론

머지않아 giga급의 반도체소자가 양산, 시판되는 상황이 온다. 따라서 초고집적 반도체소자의 커패시터부에 강유전체의 적용은 필연이고 시급하다. 강유전체 중에서 PZT[Pb(Zr,Ti)O₃]는 bulk 상태에서 10⁴에 가까운 유전상수를 나타낼 수 있는데 이 값은 기존의 고집적 반도체소자 공정에서 사용해 왔던 Si-oxide나 -nitride에 비해 천배 이상에 달하는 것이고 또 PZT는 스위칭 특성도 우수

하여 초고속 소자로의 응용 가능성도 기대되는 등^{1,2)} 미래대비형 장점이 크다. 반면에 PZT는 박막 및 소자 제조 공정에서의 입열(heat-input)에 의해 그 성분 중의 하나인 Pb가 휘발 손실되고 그렇게 형성된 Pb vacancy가 정공을 창출하면서 PZT에 p-형 반도체성을 띠게 하여 결국 누설전류가 커지는 단점을 갖고있다.³⁾ 강유전 박막 형성에 있어 Pb의 휘발, 결핍에 관련된 문제는 대부분의 연구자들이 과잉 Pb를 함유한 타겟을 사용하여 대처하고 있다.

그런데 또 하나의 실질적인 문제점으로, 위와 같

*Corresponding author
E-mail: jpmah@honam.ac.kr

은 입열에 의해 하부전극을 비롯한 PZT 박막 하부의 물질들과 산소가 확산하여 계면 반응을 일으키거나 PZT 박막내로 침투하여 결국 그것에 기인하는 강유전 특성의 열화를 일으키는 현상이 있다.^{4,9)} 그것에 대한 대응책을 보면 첫째로 하부전극을 oxide와 같이 보다 안정한 물질로 바뀌주는 방법이 주로 연구되고 있는데, 그 중에서도 전기전도도가 좋고 확산에 대한 장벽 역할도 양호한 Ru-oxide가 많이 보고되고 있다.¹⁰⁻¹⁶⁾

하부전극을 비롯한 물질들의 확산 등에 대응할 수 있는 두 번째 방법은 기존의 Pt을 그대로 하부전극으로 사용하되 강유전 박막을 2단계로 입히는 것이다. 즉, 상온에서 우선 얇게 강유전체층을 입힌 후 그 바닥층 위에 나머지 두께를 in-situ 방법으로 증착하는 것이다. 기존의 연구에서 이 방법으로 PZT나 BST(Barium Strontium Titanate) 등의 대표적인 강유전체에 일단 적용해본 결과 누설전류 개선현상이 뚜렷하게 나타났다.¹⁷⁻²⁰⁾ 특히 어떤 물질을 채택한 경우에 있어서도 10배 이상의 누설전류 감소를 유도해낼 수 있었다. 단지 2단계 스퍼터링을 한 경우는 일부에서 전도 기구가 바뀌는 현상이 발견되었고²¹⁾ 전도 기구에 대한 이해가 문제 해결의 근원이 되므로 보다 자세하고 다양한 연구가 필요하다고 생각되었다.

본 연구에서는 2단계 스퍼터링으로 강유전박막을 제조하여 누설전류 특성의 개선을 기하고자 하였다. 또한 실제 적용 가능성을 더욱 높여주기 위해 바닥층 및 총 두께를 더욱 얇게 하여 그에 수반되는 전기적 특성 변화를 조사하여 본 분야 연구의 기반을 제시하려고 하였다.

특히 각 박막형성 조건에서의 전도 기구를 고찰, 정립하여 누설전류 개선 관련 연구, 개발의 출발점도 확고히 제시하고자 하였다.

2. 실험방법

PZT 박막을 증착하기 위한 타겟은 Pb와 Ti 성분의 휘발에 대처하기 위해 5% 과잉 PbO가 함유되고 Zr/Ti 비가 30/70인 bulk-PZT 타겟을 주문 제작하여 사용하였다.

PZT 박막의 증착은 rf-마그네트론 스퍼터링기를 사용하였는데, 기판-타겟 거리는 5 cm로 하였다. 120 Watt(=2.63 W/cm²)의 rf power를 가하여 Pt/Ti/

SiO₂/Si 기판 상에서 in-situ 방법으로 주로 수행하되 2단계 스퍼터링을 한 경우는 상온에서 먼저 바닥층을 증착한 후 나머지 두께를 최고 650°C까지의 온도에서 각각 in-situ 방법으로 입혔다.

Base pressure는 10⁻⁶ Torr. 수준까지 뽑아 주었고 Ar과 O₂ 개스를 주입하며 시행한 working pressure는 5.0×10⁻² Torr로 잡았다.

증착 속도는 본 연구에서 채택된 강유전상 형성 온도인 650°C에서 입힌 층이 약 6.7 nm/min였고 상온층은 이보다 약간 빠른 7.5 nm/min여서, 이 속도를 토대로 총 두께 100 nm에서 250 nm까지의 시편들을 각각 제조하였다.

스퍼터링기 챔버로의 개스 유입량은 Ar/O₂의 비가 9/1이 되게 MFC(mass flow controller)로 조절해 주었다.

기판온도는 최고 650°C까지 주었고, 2단계 스퍼터링을 한 경우에는 먼저 상온에서 총 두께의 5%, 10% 등으로 5%씩 간격을 두어 얇게 입혔는데 이는 총두께 175 nm인 시편의 경우 약 9 nm, 18 nm 등을 상온에서 형성시킨 경우에 각각 해당한다. 그 위에 in-situ 방법으로 나머지 두께를 입히는 방식으로 상온층의 두께를 바꿔가며 시편을 만들어 그 특성을 비교하고자 하였다.

스퍼터링의 기본 조건들은 Table 1에 정리하였다.

강유전 특성을 나타내는 perovskite 구조의 형성 여부를 알아보기 위해 XRD(X-ray diffractometer)를 이용하였고, 증착 속도를 알기 위한 두께 측정 및 계면 관찰 등을 위해 SEM(Scanning Electron Microscope)을 사용하여 50,000~100,000배의 배율로 관찰하였다. 박막의 전기적 특성들을 측정하기 위해 필요한 상부전극으로 Al을 E-beam 증착기를 이용해 면적이 2.4×10⁻⁴ cm²인 dot 형태로 증착해 주었다. 그리고 HP4145B로 박막의 I-V 특성을 조

Table 1. Experimental condition of PZT thin film

Target	Bulk-PZT target
Substrate	Pt(300nm)/Ti(100nm)/SiO ₂ /Si
Substrate-target distance	50(mm)
Base pressure of system	6.0×10 ⁻⁶ Torr.
Working pressure	5.0×10 ⁻² Torr.
Ar:O ₂ flow-in ratio	9:1
rf power	120 W
Film thickness	175 nm, 250 nm

사, 고찰하였고 그 결과로부터 각 전압에 따른 누설전류밀도를 환산하였다. C-V 특성은 Boonton 7200 capacitance meter를 이용하여 조사하였고 그 결과를 이용하여 유전상수를 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 공정조건 결정 및 기본 특성

PZT 박막의 강유전 perovskite 상 형성 온도를 결정하기 위해 600°C와 그 이상의 온도에서 증착한 시편들의 결정구조를 XRD로 분석한 결과, 650°C 보다 낮은 온도에 대해서는 상유전상인 pyrochlore 구조의 피크가 나타났고, 강유전 PZT상인 perovskite만의 피크는 650°C에서 형성시킨 시편에서만 나타났다. 본 연구에서는 bulk-타겟을 사용하였기 때문에 이와 같은 결과가 나타난 것으로 생각된다. 즉, PZT 성분들이 더 강한 응집상태로 존재하는 bulk-타겟을 사용할 경우, 분말형 타겟을 실험실에서 직접 성형, 제조하여 사용한 기존의 연구결과^{20,22)}에 비해 약간 높은 온도에서 강유전 perovskite상이 형성됨을 볼 수 있었다.

XRD 결과 중 600°C와 650°C의 경우는 Fig. 1(a), (b)와 같았다. 따라서 본 연구에서는 2단계 스퍼터링을 시행할 때의 상온층을 제외한 층은 모두 650°C에서 증착하였다.

다음으로, 스퍼터링에 의한 증착속도를 알아보기 위해 650°C에서 120분 증착한 PZT 박막의 단면을 SEM으로 관찰한 결과, Fig. 2와 같았다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 약 800nm의 PZT가 증착되어, 650°C에서는 약 6.7 nm/min의 증착속도를

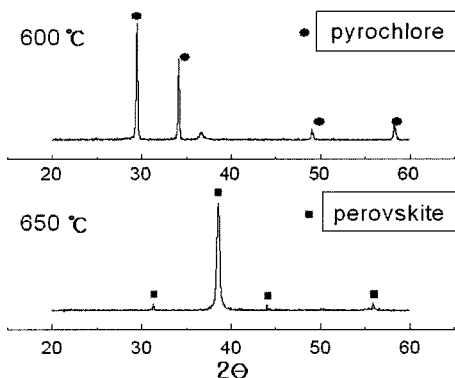


Fig. 1. XRD peaks of PZT thin films sputter-deposited at (a) 600°C and (b) 650°C.

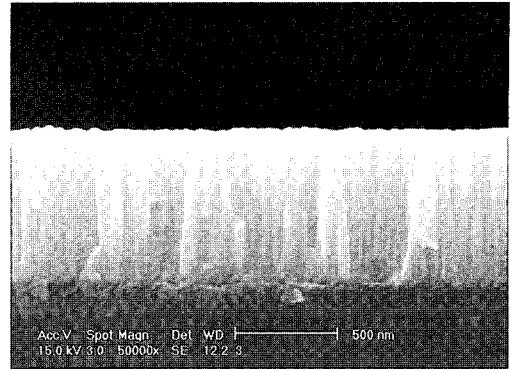


Fig. 2. Cross-sectional SEM micrograph of PZT thin film sputtered at 650°C on Pt/Ti/SiO₂/Si substrate.

보임을 알 수 있었고, 같은 방법으로 상온층의 증착 속도를 조사한 결과 약 7.5 nm/min였다. 따라서, 이와 같은 증착속도를 토대로 총 두께 및 상온층인 바닥층의 두께를 조절하며 PZT 박막을 제조하였다.

100 nm에서 250 nm까지 두께를 변화시키며 650°C에서 스퍼터 증착한 PZT 박막의 유전상수와 누설전류를 조사한 결과 각각 Fig. 3 및 Fig. 4와 같았다. Fig. 3의 유전상수값을 보면 가장 두껍게 입힌 250 nm의 경우 1048에 달하며 175 nm에서 입힌 경우도 440의 양호한 값을 나타내는 반면, 100 nm로 아주 얇게 증착했을 때는 유전특성의 열화가 두드러져서 250의 유전상수를 보인다. 기존의 보고 중 우수한 유전상수를 나타낸²³⁾ 결과와 비교할 때, 본 연구의 결과는 총두께가 100 nm인 경우를 제외하고는 손색이 없는 유전상수를 나타냈다.

한편 Fig. 4와 같이 나타난 2.5 V에 대한 누설전류밀도는, 세 경우 모두 10⁻⁵에서 10⁻⁴ A/cm² 정도

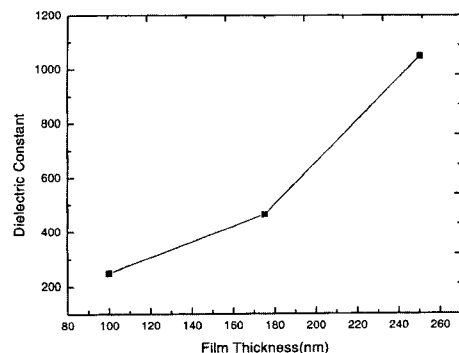


Fig. 3. Dielectric constants of PZT thin film with film thickness.

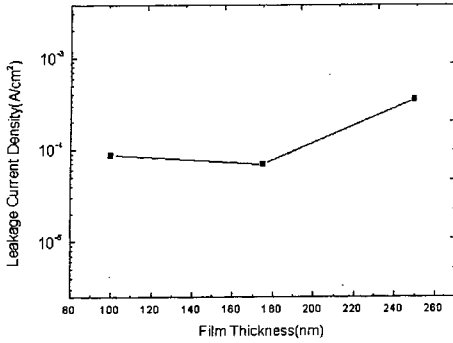


Fig. 4. Leakage current densities of PZT thin film with film thickness.

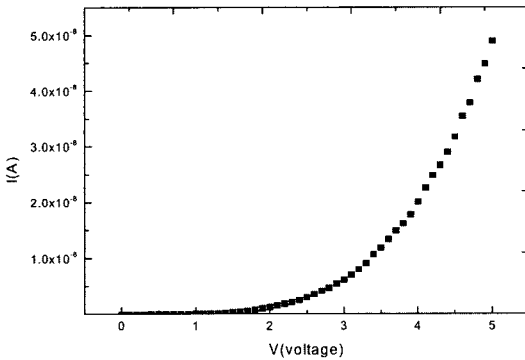


Fig. 5. Leakage current of PZT thin film deposited at 650°C.

의 비슷한 값을 보이고 있다. 따라서 본 연구에서는 총두께의 축소를 지향한다는 의미에서 주로 175 nm로 증착한 PZT 박막의 특성 조사를 주로 하였다. 그런데, Fig. 4에서 전반적으로 기존의 보고에^{7,8)} 비해 작지 않은 누설전류밀도가 나타나는게 특이한데, 이는 본 연구에서 bulk-타겟을 사용한데 따른 강유전상 형성온도의 상승에 따라 나타난 결과로 보여지며, 이러한 현상도 2단계 스퍼터링으로 크게 회복시킬 수 있을 것으로 생각되었다.

175 nm의 두께로 650°C에서 증착한 시편의 전류-전압 특성을 측정한 결과는 Fig. 5와 같았다. 앞서 Fig. 4에서 본 바와같이 2.5 V에서는 누설전류가 크게 나왔지만, 1.5 V 정도까지의 전압에 대해서는 누설전류가 거의 없음을 볼 수 있다.

3.2 2단계 스퍼터링

공정 중의 입열에 의한 PZT 박막의 하부층 물질 등의 확산을 줄여주기 위하여 본 연구에서는, 우

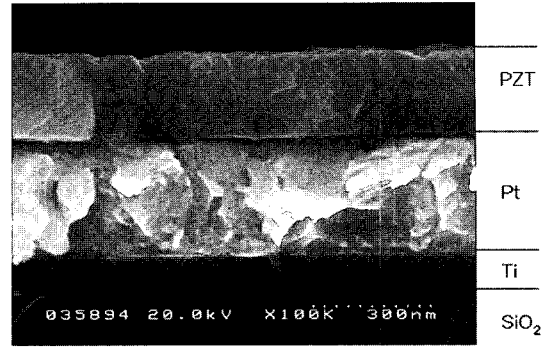


Fig. 6. Cross-sectional SEM micrograph of PZT thin film deposited on Pt/Ti/SiO₂/Si substrate by 2-step sputtering.

선 상온에서 PZT 박막을 얇게 입혀주고 in-situ 방법으로 650°C에서 나머지 두께를 입힌 시편들을 제조하여 특성을 조사하였다.

상온에서 30 nm, 나머지 두께를 650°C에서 입혀 총 두께 250 nm인 시편을 제조하여 SEM으로 관찰한 결과, Fig. 6와 같았다. 최상부부터 PZT, 300 nm 정도 두께인 하부전극 Pt, 그리고 완충층인 Ti (두께 100 nm) 등의 층이 차례로 나타나는데, 이 층들끼리 잘 구별되는 것으로 보아, PZT와 하부전극 물질의 극심한 확산 및 계면 반응 등이 일어나지는 않은 것으로 생각되었다. 특히 본 연구는 650°C라는 비교적 높은 온도를 부여한 경우임에도 불구하고, 최근의 보고에서의 EDS 분석 결과와 같이⁹⁾ PZT 박막의 하부에 형성시켜준 상온층에 의한 확산 억제 효과로 기관과 PZT 박막 물질의 안정을 기할수 있었다고 판단되었다.

특히 이 결과에서는 PZT층 내의 상온층과 650°C에서 입힌 층 사이의 계면은 전혀 나타나지 않는다. 2-단계 스퍼터링에 의한 PZT 박막에 관한 기존의 보고에서는 상온층이 600°C의 고온처리 공정에서도 강유전상으로 바뀌지 않고 비정질 층으로 존재한다고²⁰⁾ 했는데, 본 연구에서는 그렇지 않은 결과가 나온 것이다. 즉, 상온층은 차후의 650°C 공정에서의 입열에 의해 PZT 자체 내 약간의 확산유동을 쉽게 일으켜 한 상(phase)으로 변화했다고 볼 수 있다.

따라서 상온층은 PZT 층의 하부 물질의 확산을 효과적으로 막아주었을 뿐만 아니라 차후의 고온 공정에 의해 단일상으로 변화하여, 기대했던 두 가지 효과를 모두 만족시킬 수 있다고 생각되었다.

이와 같은 상온층의 효과를 더 자세히 알아보기 위해, 총 두께를 175 nm로 하고 상온층의 두께를 총 두께의 5, 10, 15% 등으로 5%씩, 즉, 약 9 nm, 18 nm, 26 nm 등으로 변화시키며 2단계 스퍼터링 하여 제조한 시편들의 유전상수와 누설전류를 조사한 결과 각각 Fig. 7, Fig. 8과 같았다.

먼저 상온층 두께에 따른 유전상수값을 상온층을 입히지 않은 경우와 더불어 나타낸 Fig. 7을 보면, 모든 시편에서 400에서 700 사이의 대체로 큰 값을 보였다. 가장 얇은 상온층을 포함하는 경우, 즉 총두께의 5%인 9 nm 정도의 매우 얇은 상온층을 포함시킨 경우에 대해서도 500에 가까운 유전상수가 나타났는데 이 값은 상온층을 입히지 않고 전체 두께를 in-situ 방법으로 입힌 시편의 유전상수에 비해 50 정도 큰 값이다. 그리고 상온층의 두께 증가에 따라 유전상수는 조금씩 증가하여, 총 두께의 20%에 해당하는 35 nm의 상온층을 포함시킨 경우 650 이상의 값을 보였다.

2단계 스퍼터링한 같은 시편들에 대해 누설전류를 조사한 결과인 Fig. 8을 보면, 상온층을 9, 18

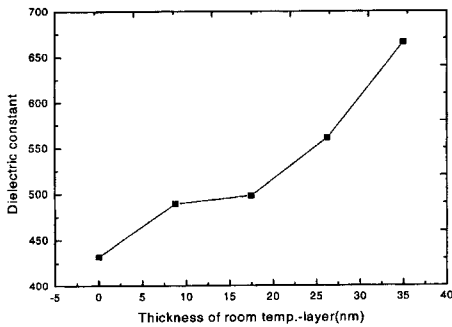


Fig. 7. Dielectric constant of PZT thin films with thickness of room temp.-layer.

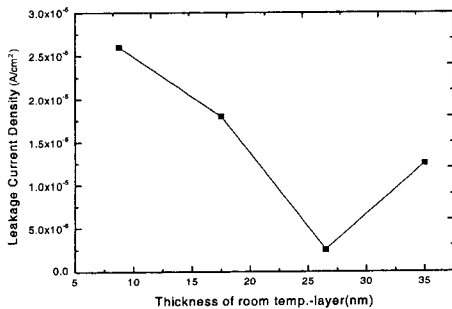


Fig. 8. Leakage current densities of PZT thin films with thickness of room temp.-layer.

nm 정도로 매우 얇게 입혀준 경우는, 상온층을 입히지 않고 650°C에서만 증착한 경우와 같이 모두 10⁻⁵ A/cm² 수준의 누설전류 밀도가 나타난다. 이와같이 저조한 누설전류 특성은 앞서 설명한 바와 같이 본 연구에서 채택한 강유전상의 형성온도가 비교적 높은 650°C이기 때문인 것으로 보인다.

상온층의 두께에 따라 약간 감소하던 유전상수 값은 총 두께의 15%에 해당하는 26 nm의 상온층을 포함시킬 때 가장 작은 누설전류를 나타내고 그보다 두꺼운 상온층을 입혀준 경우는 다시 증가하는 경향을 나타냈다. 여기서, 상온층은 너무 얇을 때는 하부전극물질의 확산을 크게 저지하지는 못하다가 어느 정도의 두께 이상 입혀주어야 확산을 강하게 저지할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 지나치게 두꺼운 상온층은 차후의 in-situ 공정에서의 입열에 의한 강유전상으로의 상변화가 완벽하게 일어나지는 못하는 것으로 판단되었다. 그리고 26 nm의 상온층을 포함하는 시편의 누설전류 밀도 값을 환산한 결과 2x10⁻⁷ A/cm²의 매우 작은 값에 해당하여, 2단계 스퍼터링으로 기대했던 결과를 얻을 수 있었다고 생각되었다. 이 값은 앞서 in-situ 공정으로만 제조한 시편에 비해 누설전류가 100배 정도 개선된 것이다.

2단계 스퍼터링을 한 경우도 전도기구가 bulk-limit 인지 확인해보기 위해, 총두께의 10%인 9 nm 정도의 상온층을 포함시켜 입힌 시편의 I-V 특성을 조사하여 reverse voltage에 대한 전류값을 +값으로 부호만 바꾸어 plot한 결과 Fig. 9과 같았다. Fig. 9에서, 전류-전압 관계의 모양을 살펴보면 강한 대칭 성향이 나타남을 알 수 있다. 즉 이는 barrier-limit가 아닌 경우로, ohmic 특성을 대변하는

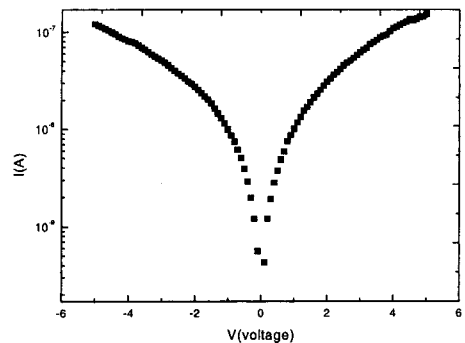


Fig. 9. I-V symmetric characteristics of PZT thin film by 2-step sputtering.

전형적인 모양인 것이다. 본 연구에서와 같이 하부전극으로 Pt를 채택하여 2단계 스퍼터링으로 제조한 PZT 박막의 경우도 ohmic 특성을 보임을 확인할 수 있었다.

이와 같은 결과로부터 PZT 박막의 누설전류가 bulk-limit 기구를 따름을 확인할 수 있어서, 그것의 누설전류 특성을 개선하기 위해서는 PZT 내에 존재하는 전하운반자인 정공을 상쇄시켜주기 위한 불순물의 첨가가 적절한 방법임을 알 수 있었다.

3.3 누설전류 기구

앞서 2단계 스퍼터링으로 증착한 시편의 누설전류 기구를 살펴본 결과 bulk-limit인 경우로 나타난 바 있었는데, 각기 다른 공정 조건으로 제조한 시편들의 누설전류기구도 확인해보기 위해서 각각의 I-V 특성을 조사, plot하여 개략적 모양을 관찰하였다.

Fig. 10, 11, 12가 그 결과인데, Fig. 10은 in-situ 방법으로 증착하지 않고 상온에서만 증착한 후 650°C에서 in-situ 방법으로 증착할 때와 동일한 시간동안 가열해준 시편에 대한 것이며, Fig. 11은 2단계 스퍼터링한 시편 중 가장 누설전류가 가장 작게 나타났던 26 nm의 상온층을 포함하는 경우이고, Fig. 12는 Ta-doped 시편을 26 nm의 상온층을 포함시켜 2단계 스퍼터링한 경우이다.

공정 또는 물질의 조건이 다른 세 경우에서 모두 점대칭 경향을 나타내서 barrier-limit인 경우와는 거리가 먼 것으로 볼 수 있었고, 조건에 상관없이 전형적인 ohmic 성향이 나타나서, PZT 박막은 bulk-limit 기구를 따르는 누설전류 현상을 보이는 것으로 결론지을 수 있었다.

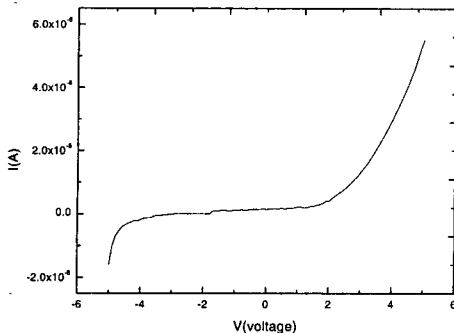


Fig. 10. I-V characteristic of PZT thin film annealed at 650°C.

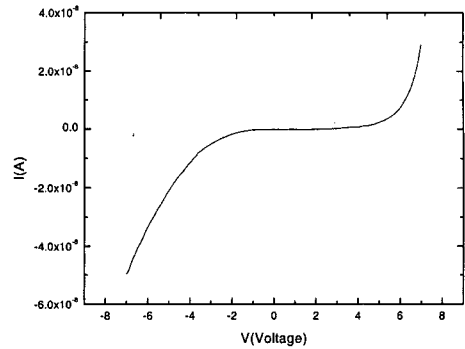


Fig. 11. I-V characteristic of PZT thin film formed by 2-step sputtering.

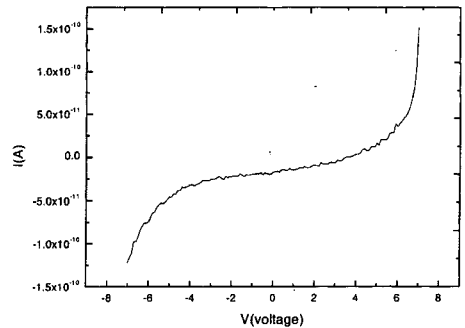


Fig. 12. I-V characteristic of Ta-doped PZT thin film formed by 2-step sputtering.

한편 Ta-doped 시편의 경우, Fig. 12에서와 같이 2.5 V일 때 누설전류가 거의 발생하지 않았고, 4 V 정도까지 올려주어야 미미한 전류가 나타나서 doping의 의해 누설전류 특성을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 기대할 수 있었다.

4. 결 론

강유전 PZT 박막을 2단계 스퍼터링 등 공정 조건을 변화시키며 증착하여 그 특성을 조사한 결과 얻은 주요 결론은 다음과 같았다.

5% 과잉 PbO를 포함하는 bulk PZT 타겟을 사용하여 스퍼터링하는 경우, 강유전 perovskite 상의 형성 온도는 650°C였다.

2단계 스퍼터링에서는, 적절한 두께의 상온층을 포함시킨 경우 2×10^{-7} A/cm²로 크게 개선된 누설전류 특성을 얻을 수 있었고 그 경우 유전상수도 500 이상으로 양호했는데, PZT 박의 증착 초기에 얇게 형성시켜준 상온층이 하부전극 물질 등의 확

산을 억제시켜준 결과로 볼 수 있다.

PZT 박막의 누설전류 현상의 근원인 전도기구 조사에서는, 여러 공정조건에서 제조한 시편들 모두가 bulk-limit 기구를 따르는 전류-전압 특성을 나타냄을 알 수 있었다. 이와같은 전도기구에 대한 이해와 확인을 토대로, 도너 도핑으로 PZT 박막 내 전하운반자의 보상까지를 간단히 조사한 결과, 누설전류 특성이 더욱 개선됨을 정성적으로 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 호남대학교 2002년도 논문장려 특별 연구비의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Y. Xu, "Ferroelectric materials and their applications", Elsevier, pp.101-135(1991).
2. C. K. Kwoh, "Ferroelectric Thin Films"(Mater. Res. Soc. Symp. Proc.), p.83(1990).
3. C. Sudhama, A. C. Campbell, P. D. Maniar, R. E. Jones, R. Moazzami, C.J. Mogab and J.C. Lee, "A model for electrical conduction in metal-ferroelectric-metal thin film capacitors", J. Appl. Phys., 75, 2, 1014(1994).
4. Y. S. Hwang, S. H. Paek, C. S. Park, E. S. Lee, J. H. Won and J. P. Mah, "On the relationship between the interface reaction and annealing method of Lead Zirconate Titanate thin film on Pt/Ti/Si substrate", J. Mater. Sci. Lett., 14, 6, p.1168 (1995).
5. Y. S. Hwang, S. H. Paek, Y. H. Ha, J. S. Choi, H. C. Cho and J. P. Mah, PZT 박막 capacitor에 관한 기초 연구(I), 한국재료학회지, 3, 1, 19(1993).
6. J. P. Mah, C. S. Park, S. H. Paek, Y. S. Hwang, S. H. Baek, J.S. Choi and H.C. Cho, 초고집적회로용 PZT 박막의 형성 조건, 전자공학회논문지, 30-A, 10, 59 (1993).
7. Y. S. Hwang, S. H. Paek, S. H. Baek, C. S. Park, J. P. Mah, J.S. Choi, J.G. Chung, Y.N. Kim and H.C. Cho, Pt/Ti/Si 기판 위에 형성시킨 PZT박막의 특성, 한국재료학회지, 4, 2, 143(1994).
8. Y. S. Hwang, PZT 박막의 계면반응 및 누설전류 개선에 관한 연구, Ph.D thesis at Hanyang Univ.(1995).
9. J. P. Mah, Improvement of leakage current in ferroelectric thin films formed by 2-step sputtering, 한국과학재단 지역대학우수과학자 육성지원연구 보고서(2004).
10. Y. T. Kim, "Achievement of zero temperature coefficient of resistance with RuOx thin film resistors", Appl. Phys. Lett., 70, 209(1997).
11. K. Yoshikawa, T. Kimura, H. Noshiro, S. Otani M. Yamada and Y. Furumura, "RuO₂ thin films as bottom electrodes for high dielectric constant materials", Jpn. J. Appl. Phys., 33, L867(1994).
12. H. Maiwa, N. Ichinose and K. Okazaki, "Preparation and properties of Ru and RuO₂ thin film electrodes for ferroelectric thin films", Jpn. J. Appl. Phys., 33, 5223(1994).
13. K. Watanabe, J. F. Tressler, M. Sadamoto, C. Isobe and M. Tanaka, "Characterization of solution derived RuO₂ electrodes for Pb(Zr,Ti)O₃ microcapacitors", J. Electrochem. Soc., 143, 3008(1996).
14. D. K. Choi, J. Y. Choi, J. H. Won and S. H. Paek, "Microstructural control of RuO₂ electrodes and the related properties of (Ba,Sr)TiO₃ thin films", Mater. Res. Soc. Proc., 433, 45(1996).
15. K. Sakiyama, S. Onishi, K. Ishihara, K. Orita, T. Kajiyama, N. Hosoda and T. Hara, "Deposition and properties of reactively sputtered Ruthenium Dioxide films", J. Electrochem. Soc., 140, 834(1993).
16. E. Kolawa, F. C. T. So, E. T-S. Pan and M-A. Nicolet, Appl. Phys. Lett., "Reactively sputtered RuO₂ diffusion barriers", 50, 854(1987).
17. C. S. Park, S. H. Paek, Y. S. Hwang and J. P. Mah, "Improvement of leakage current of PZT thin film by amorphous layer", Proc. 3rd IUMRS Int. Conf. in Asia, 1037(1995).
18. J. P. Mah, S. H. Paek and Y. S. Hwang, "초고집적회로의 커패시터용 PZT박막의 입열조건에 따른 유전 특성", 전자공학회 논문지, 32-A, 12, 101(1995).
19. S. H. Paek, K. S. Lee, J. P. Mah and C. S. Park, "비정질 (Ba,Sr)TiO₃ 층의 도입을 통한 (Ba,Sr)TiO₃ 박막의 특성 향상", 결정성장학회지, 8, 2, 221(1998).
20. J. P. Mah, "PZT 박막의 누설전류 개선에 관한 연구 I", 마이크로전자 및 패키징학회지, 5, 1, 101(1998).
21. Y.S. Hwang, S. H. Paek and J. P. Mah, "The leakage current mechanism of PZT thin films deposited by in-situ sputtering", J. Mater. Sci. Lett., 15, 12, 1030 (1996).
22. R. Thomas, S. Mochzuki, T. Mihara and T. Ishda, Effects of PbTiO₃ seed layer on the characteristics of rf-sputtered Pb(Zr_{0.5}Ti_{0.5})O₃ thin films, Integrated Ferroelectrics, Proc. Symp. on Integrated Ferroelectrics, Part II, 46, 317(2002).
23. K. W. Lee and W. J. Lee, Pt 상부 전극 증착온도가 PZT 박막의 전기적 특성에 미치는 영향, 한국재료학회지, 8, 11, 1048(1998).