

The Effects of the Heat Treatment of the ZrO_2 Buffer Layer and SBT Thin Film on Interfacial Conditions and Ferroelectric Properties of the $SrBi_2Ta_2O_9/ZrO_2/Si$ Structure

Young-Hun Oh, Chul-Ho Park, and Young-Guk Son[†]

School of Materials Science and Engineering, Busan National University, Busan 609-735, Korea
(Received July 13, 2005; Accepted July 15, 2005)

ZrO_2 완충층과 SBT 박막의 열처리 과정이 $SrBi_2Ta_2O_9/ZrO_2/Si$ 구조의 계면 상태 및 강유전 특성에 미치는 영향

오영훈 · 박철호 · 손영국[†]

부산대학교 재료공학부

(2005년 7월 13일 접수; 2005년 7월 15일 승인)

ABSTRACT

To investigate the possibility of the ZrO_2 buffer layer as the insulator for the Metal-Ferroelectric-Insulator-semiconductor (MFIS) structure, ZrO_2 and $SrBi_2Ta_2O_9$ (SBT) thin films were deposited on the P-type Si(111) wafer by the R.F. magnetron-sputtering method. According to the process with and without the post-annealing of the ZrO_2 buffer layer and SBT thin film, the diffusion amount of Sr, Bi, Ta elements show slight difference through the Glow Discharge Spectrometer (GDS) analysis. From X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) results, we could confirm that the post-annealing process affects the chemical binding condition of the interface between the ZrO_2 thin film and the Si substrate. Compared to the MFIS structure without the post-annealing of the ZrO_2 buffer layer, memory window value of MFIS structure with post-annealing of the ZrO_2 buffer layer were considerably improved. The window memory of the Pt/SBT (260 nm, 800°C)/ ZrO_2 (20 nm) structure increases from 0.75 to 2.2 V under the applied voltage of 9 V after post-annealing.

Key words : ZrO_2 buffer layer, $SrBi_2Ta_2O_9$ thin film, MFIS structure ferroelectric random access memory

1. 서 론

반도체는 1948년 미국에서 발명되어 성공을 거둔 이래 오늘날까지 눈부신 발전을 해오고 있다. 최근 들어 이러한 반도체 산업의 고집적화 및 전자 부품의 소형화 추세로 인하여 기능성 재료의 박막화가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 반도체 기술 중 강유전체를 박막화 하여 메모리 소자로 응용하려는 시도가 꾸준히 이루어지고 있다. 차세대 비휘발성 메모리용 소자로 사용 가능성이 높은 FRAM(Ferroelectric Random Access Memory)은 기본적으로 비휘발성 특성을 가지며, bit 당 생산비가 낮고 고집적화가 가능하다. 또한 Access time이 빠르며 전력소모가 적고, radiation에 대한 저항성이 큰 장점도 가지고 있다. FRAM은 EEPROM과 비교할 때 write/erase cycle 횟수가 10^{10} 대 $10^4 \sim 10^5$ 으로 월등히 우수하며 SRAM과 비교할 때

read/write cycle time은 비슷하나 FRAM은 별도의 battery 없이 비휘발성 특성을 유지할 수 있는 장점을 가지고 있다.¹⁾

이러한 FRAM은 크게 두 가지로 구분 할 수 있는데 DRO(Destructive Read Out)형과 NDRO(Nondestructive Read Out)형이 있다. 강유전체를 이용한 일반적인 FRAM은 DRO 방식의 FRAM이로서 1 캐패시터 + 1 트랜지스터 구조 또는 2캐패시터 + 2 트랜지스터 구조로 이루어진다. 이 구조의 경우 소자의 안정적인 동작이 보장되는 반면 공정상의 복잡성과 셀 크기의 증가로 인한 고집적화가 이루어지기 힘들다는 단점이 있다. 또한 소자의 데이터 저장이나 판독 시 강유전체 물질의 분극 변화를 수반하기 때문에 피로에 의한 소자 내구성의 문제를 안고 있다. 반면 Metal-Ferroelectric-Semiconductor(MFS)-FET 구조를 가지는 NDRO FRAM의 경우는 분극의 반전을 이용한 데이터의 판독을 행하지 않으므로 소자 내구성에서 상당한 이점을 가지고 있으며 또한 캐패시터가 불필요함으로 셀의 면적 축소에 의한 고집적화를 이룰 수 있다는 장점이 있다.²⁾ 하지만 MFS 구조에서는 강유전체와 Si 기판 계면에서 상호 확산에 의한 중간상 (intermediate phase)

[†]Corresponding author : Young-Guk Son

E-mail : ykson@pusan.ac.kr

Tel : +82-51-510-2445 Fax : +82-51-512-0528

의 형성으로 인한 소자 특성 저하가 문제로 지적되고 있다.³⁾

따라서 이러한 문제를 극복하고자 강유전체와 Si 기판 사이에 완충층 역할을 하는 산화막을 삽입한 Metal-Ferroelectric-Insulator-Semiconductor(MFIS)-FET 구조를 제작하여 이러한 문제점을 해결하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 주목 받고 있는 산화물로는 HfO₂, ZrO₂, CeO₂, Y₂O₃,⁴⁾ Al₂O₃, SiO₂ 등을 들 수 있다. 이 중에서 ZrO₂는 900°C의 고온에서 silicate를 형성하지 않고 고온에서 안정하기 때문에 MFIS FET 구조의 완충층으로 가장 주목 받고 있는 재료이다. ZrO₂는 monoclinic, tetragonal, cubic 상과 amorphous 상으로 존재한다. ZrO₂ 상은 제조 방법과, 공정 조건에 의해서 결정된다. ZrO₂ 박막은 이제 까지 reactive beam evaporation, sputtering,⁵⁾ ion-assisted deposition, pulsed laser deposition, sol-gel법 등으로 제조되어 왔다. 특히 reactive sputtering 의 경우 미세구조와 박막의 성질에 증착조건이 크게 영향을 미친다고 알려져 있다.

본 연구의 목표는 ZrO₂ 완충층의 열처리에 따른 Pt/SBT/ZrO₂/Si 구조의 전기적 특성과 계면 특성을 비교하는 것이다. 더불어 고성능 FRAM 개발에서 MFIS 구조의 적용 가능성을 타진해 보는 것이다. ZrO₂와 SBT 박막은 p-type Si (111) 기판에 R.F. magnetron-sputtering 방법으로 증착하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 p-type Si(111) 웨이퍼를 1.5 × 1.5 cm의 크기로 절단하고, RCA 세정법으로 시편의 불순물과 금속 오염물을 제거하였다. 그 다음 Si 웨이퍼 위에 SiO₂ 층을 제거하기 위해 HF(50%)와 DI-water를 1:50으로 혼합한 용액으로 세정하고, 알코올로 세척하였다. 준비한 Si 웨이퍼 위에 R.F./D.C. magnetron sputtering으로 ZrO₂, SBT, Pt를 차례로 증착하였다.

ZrO₂ 완충층은 Si(111) 기판위에 D.C. magnetron sputtering법을 이용하여 두께를 20 nm으로 증착하였으며 ZrO₂를 증착하기 위해서 Zr 금속 타겟(99.99%)을 사용하여 반응성 스퍼터링을 하였다. 이때 아르곤과 산소의 분압비를 6:4로, D.C. power는 256 mA로 고정하여 상온에서 증착 후 800°C 산소분위기에서 20분간 열처리하였다.

SBT 박막은 ZrO₂/Si 기판위에 R.F. magnetron sputtering을 이용하여 두께를 260 nm으로 증착하였다. 이때 아르곤과 산소의 분압비를 9:1로, R.F. power는 120 W로 고정하여 상온에서 증착하였다. 그리고 SBT 박막의 결정화를 위해 관상로를 이용하여 800°C에서 1시간 열처리를 행하여 박막을 결정화하였다.

상부전극 Pt는 금속 타겟(99.99%)을 이용하여 R.F. sputtering으로 직경 0.75 mm의 도트 형태로 증착하였고, 하부 접촉은 Si 웨이퍼 후면을 10% HF 용액으로 자연 산

Table 1. Typical Deposition Conditions for ZrO₂, Pt, SrBi₂Ta₂O₉ Thin Film Preparation

Thin film	ZrO ₂	Pt	SBT
Base pressure	1.5 × 10 ⁻⁵ Torr	1.5 × 10 ⁻⁵ Torr	1.5 × 10 ⁻⁵ Torr
Working pressure	1 × 10 ⁻² Torr	1 × 10 ⁻² Torr	1 × 10 ⁻² Torr
Power	256 mA(D.C.)	80 W (R.F.)	120 W (R.F.)
Sputtering gas	Ar:O ₂ (6:4)	Ar	Ar:O ₂ (9:1)
Substrate temperature	RT	RT	RT

화막을 제거한 후 은으로 음 접촉을 이루도록 하였다. 자세한 증착조건은 Table 1에 나타내었다.

증착한 시편의 결정화를 조사하기 위해 XRD(X-Ray Diffraction, Rigaku, Japan)분석을 행하였다. 이때 사용한 X-선은 32.5 kV, 25 mA, Ni 필터를 사용한 Cu K α 선 ($\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$)이다.

표면에서의 미세 구조 변화 및 두께를 관찰하기 위해 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, Hitachi S-4200, Japan)을 사용하였으며 Mechanical Stylus (Tenkor α -step, USA)를 이용하여 두께 관찰을 병행하였다.

SBT/ZrO₂/Si 구조의 깊이에 따른 조성의 변화는 glow discharge spectrometer (GDS, JY 10000RF, Jobin Yvon, France) 분석에 의해 관찰하였다. 그리고 ZrO₂ 완충층과 Si 기판 사이의 계면에서의 화학적 결합상태를 관찰하기 위해서 XPS(X-ray Photoelectron Spectroscopy, ESCALAB 250 XPS Spectrometer, VG Scientific)를 사용하였다. X-ray source로는 단색화된 Al K α 를 사용했으며 15 kV, 55 W, 250 μm 크기의 X-ray beam을 사용하였다. 에칭을 위해서 3 kV의 argon ion gun으로 30초당 한번씩의 에칭을 하였으며 charge에 의한 에너지 오차를 막기 위해서 two flood gun을 이용하였다.

ZrO₂의 열처리 과정에 따른 MFIS 구조의 C-V 특성을 알아보기 위해서 1 MHz에서 Impedance analyzer HP 4192A를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. ZrO₂ 박막의 미세구조

Fig. 1은 관상로 800°C의 산소분위기에서 20분간 후열처리 과정을 행한 ZrO₂/Si 구조와 열처리 과정을 행하지 않은 ZrO₂/Si 구조의 XRD 패턴 나타난 그림이다. 이 결과에서 ZrO₂ 완충층의 결정성은 후열처리 과정에 많은 영향을 받음을 알 수 있다. 후열처리 과정을 하지 않은 ZrO₂ 완충층에서는 결정성이 나타나지 않는 반면 800°C에서 열처리한 ZrO₂ 완충층의 경우 후열처리 과정을 통해 다결정성을 나타내었다. 약 28° 피크에서 monoclinic 상의 주된 (111) 면을 나타내며, 나머지 다른 상들에서도 monoclinic 상을 나타내었다.⁶⁾ 일반적으로 electron beam으로 증착한

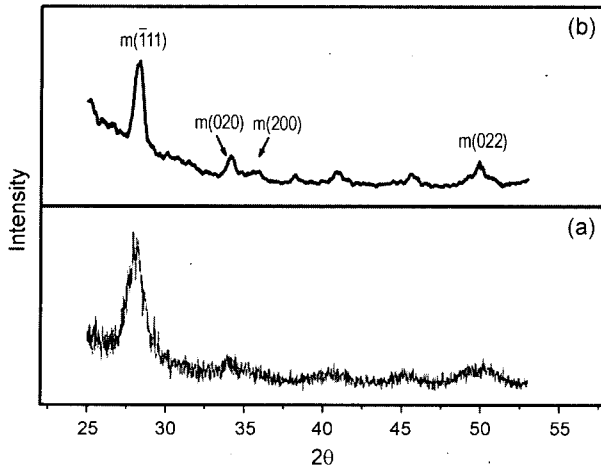


Fig. 1. The XRD patterns of the ZrO_2 thin films deposited on the Si substrate; (a) ZrO_2 film without the post-annealing process and (b) ZrO_2 film with the post-annealing at $800^\circ C$ for 20 min.

ZrO_2 박막의 미세구조와 Kim,⁷⁾ Mehner⁸⁾의 결과에서는 random orientation을 나타내는 반면 본 연구에서의 박막의 주된 상은 monoclinic(ASTM 36-420)⁹⁾ 상임을 XRD 결과를 통해 확인할 수 있었다.

3.2. SBT 박막의 미세구조

Fig. 2는 관찰로 650, 700, 750, $800^\circ C$ 의 산소 분위기에서 1시간 동안 후열처리한 SBT/ ZrO_2 /Si 구조의 XRD 패턴을 나타낸 그림이다. 열처리 온도가 $800^\circ C$ 로 증가할수록, (115), (200), (2010), (317) 면이 성장하였다. $750^\circ C$ 이하의 온도에서 열처리한 SBT 박막은 뚜렷한 결정상이 나타나지 않는 반면 $800^\circ C$ 에서 열처리한 SBT 박막은 Bi-layered structure 구조로 다결정 상을 이루었다.

Fig. 3은 SBT/ ZrO_2 ($800^\circ C$)/Si 구조의 표면 및 횡단면을 나타낸 그림이다. Fig. 3(a)와 (b)는 각각 750, $800^\circ C$ 관찰

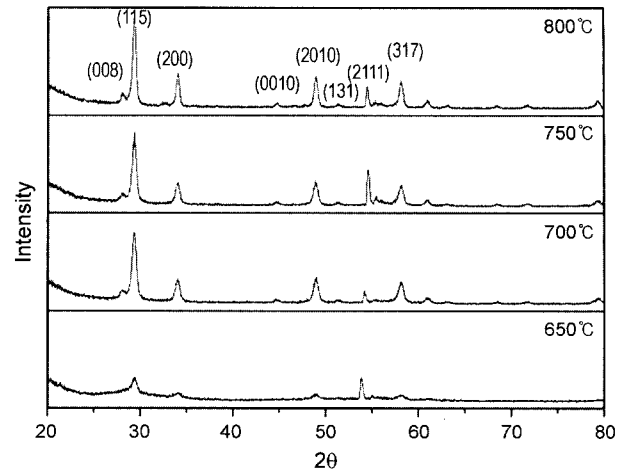


Fig. 2. The XRD pattern of SBT (260 nm)/ ZrO_2 (20 nm)/Si structures annealed at $650^\circ C$, $700^\circ C$, $750^\circ C$, $800^\circ C$ for 1 h in the O_2 ambient.

로의 산소 분위기에서 1시간씩 열처리한 SBT/ ZrO_2 /Si 구조의 표면상태를 나타낸 것이다. Fig. 2의 결과와 같이 $800^\circ C$ 이상의 온도에서 완전한 결정이 성장하였음을 알 수 있다. Fig. 3(a)에서 $750^\circ C$ 열처리한 SBT 박막의 경우 아주 미세한 결정의 다결정이었다. 이에 반면 Fig. 3(b)에서 관찰로 산소 분위기에서 $800^\circ C$ 로 1시간 열처리한 SBT 박막은 결정이 크고 다결정이었다. Figs. 2와 3에서 $800^\circ C$ 이상의 열처리 온도가 SBT 박막을 결정화 시키는 데에 필요하다는 것을 알 수 있었다.¹⁰⁾

3.3. Glow Discharge Spectrometer (GDS) 분석

ZrO_2 와 SBT 증착 후 4가지 다른 열처리 조건이 박막 조성에 미치는 영향을 SBT/ ZrO_2 /Si 구조의 GDS depth profiling을 통해서 관찰할 수 있었다.

Fig. 4는 4가지 다른 열처리 분위기에 따라 에칭시간에 대한 구성원소의 GDS 강도를 나타낸 그림이다. Fig. 4(a)

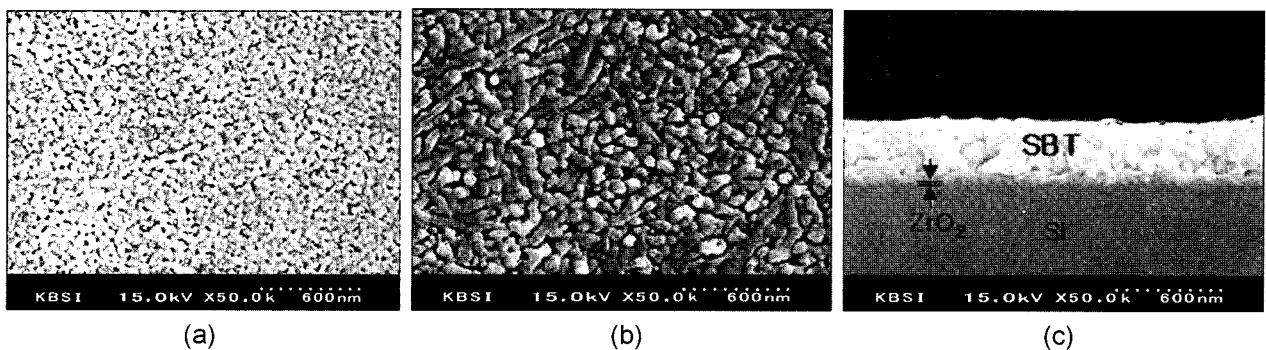


Fig. 3. The SEM micrographs of SBT (260 nm)/ ZrO_2 (20 nm, $800^\circ C$)/Si structures.

- (a) the surface image of SBT (260 nm, $750^\circ C$)/ ZrO_2 (20 nm)/Si structure
- (b) the surface image of SBT (260 nm, $800^\circ C$)/ ZrO_2 (20 nm)/Si structure
- (c) the cross sectional image of SBT (260 nm, $800^\circ C$)/ ZrO_2 (20 nm)/Si structure.

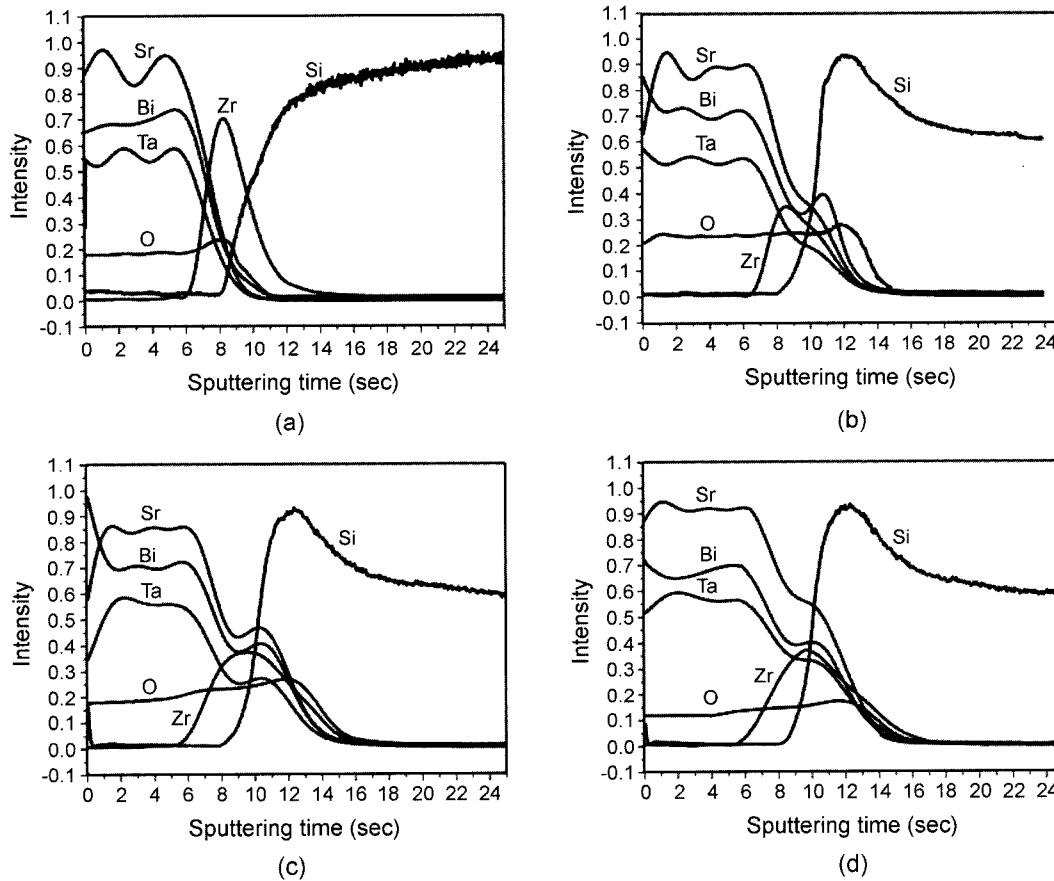


Fig. 4. The GDS depth profiles of SBT (260 nm)/ZrO₂ (20 nm)/Si structures.
 (a) SBT (without post-annealing)/ZrO₂ (without post-annealing)/Si structure
 (b) SBT (without post-annealing)/ZrO₂ (with annealing at 800°C for 20 min)/Si structure
 (c) SBT (with annealing at 800°C for 1 h)/ZrO₂ (without post-annealing)/Si structure
 (d) SBT (with annealing at 800°C for 1 h)/ZrO₂ (with annealing at 800°C for 20 min.)/Si structure.

는 ZrO₂, SBT 박막을 열처리하지 않고, Fig. 4(b)는 ZrO₂ 박막만 800°C에서 열처리한 것을, Fig. 4(c)는 SBT 박막만 800°C에서 열처리한 것을, Fig. 4(d)는 ZrO₂, SBT 박막을 800°C에서 열처리한 것이다. SBT/ZrO₂/Si 구조는 가장 밖의 표면층, SBT 박막, SBT/ZrO₂ 계면, ZrO₂층, ZrO₂/Si 계면, Si 기판으로 6층으로 나눌 수 있다. Fig. 4(a)에서 각 층은 뚜렷한 계면을 보이며 서로 독립된 층으로 존재하였다. 그러나 SBT/ZrO₂와 ZrO₂/Si의 계면에서 약간의 상호 확산은 일어났음을 확인할 수 있다. 이에 반면 Fig. 4(b)에서는 ZrO₂ 박막의 열처리 과정을 통해 상당량의 ZrO₂가 ZrO₂/Si 계면 쪽으로 확산되었다. Fig. 4(c)와 (d)는 거의 유사한 형태를 나타내지만, Sr, Bi, Ta 원자가 Fig. 4(d) 보다 Fig. 4(c)의 경우가 더 깊이 확산되었다. 그리고 Zr 원자는 Si 기판 쪽으로 Zr 피크가 꼬리모양을 형성함을 통해 Si 기판 쪽으로 깊이 확산되었음을 알 수 있었다. GDS 측정 결과를 통해 Zr, Sr, Bi, Ta 등의 원소들이 후열처리 과정을 통해 확산되었고, ZrO₂층의 후열처리

유무에 따라 Sr, Bi, Ta 원소들의 확산 정도가 약간씩 차이가 남을 알 수 있었다.

3.4. X-ray Photoelectron Spectroscopy(XPS) 분석

ZrO₂ 완충층과 Si 기판 사이 계면의 화학적 상태를 X-ray photoelectron spectroscopy을 통해하여 관찰하였다. XPS 측정을 위해 ZrO₂/Si 구조는 800°C 관상로 산소 분위기에서 20분 동안 후열처리 한 것과 하지 않은 것을 각각 준비하였다.

Fig. 5는 열처리하지 않은 ZrO₂/Si의 Si 2p에 대한 XPS spectra를 나타낸 그림이다. Si와 SiO₂의 피크의 spectra는 각각 결합 에너지 99.09 eV(Si 2p_{3/2})와 102.9 eV(Si 2p_{3/2})에서 공존하고 있음을 알 수 있다. ZrO₂/Si 계면 영역에서 SiO₂의 양이 Si에 비해 더 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 6은 열처리하지 않은 ZrO₂/Si의 Zr 3d에 대한 XPS spectra를 나타낸 그림이다. ZrO₂/Si 구조의 계면에서 결합 에너지 183.05, 185.35, 178.89, 181.02 eV는 각각 Zr-O의

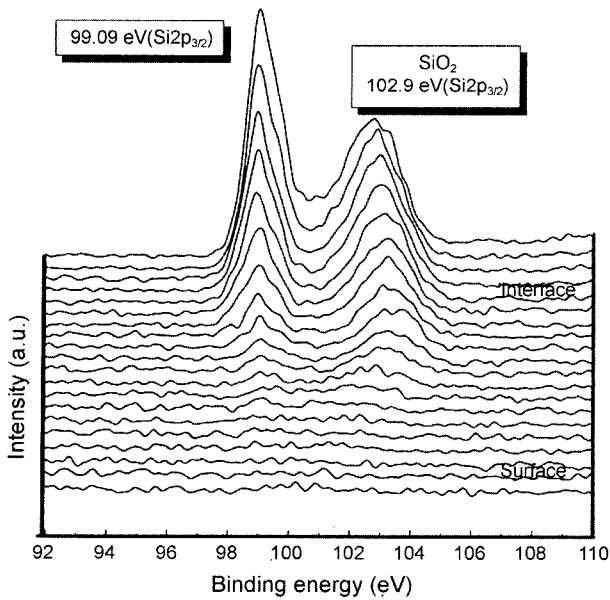


Fig. 5. The high resolution XPS spectra of Si2p of ZrO_2/Si structure without the post-annealing process.

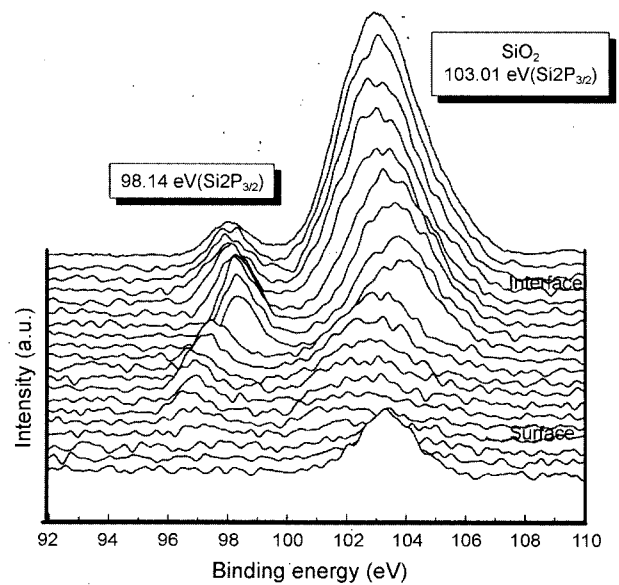


Fig. 7. The high resolution XPS spectra of Si2p of ZrO_2/Si structure annealed at $800^\circ C$ for 20 min. in the O_2 ambient.

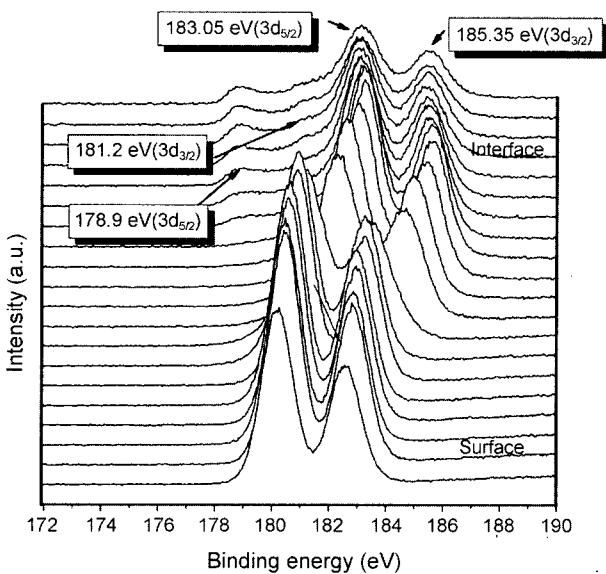


Fig. 6. The high resolution XPS spectra of Zr3d of ZrO_2/Si structure without the post-annealing process.

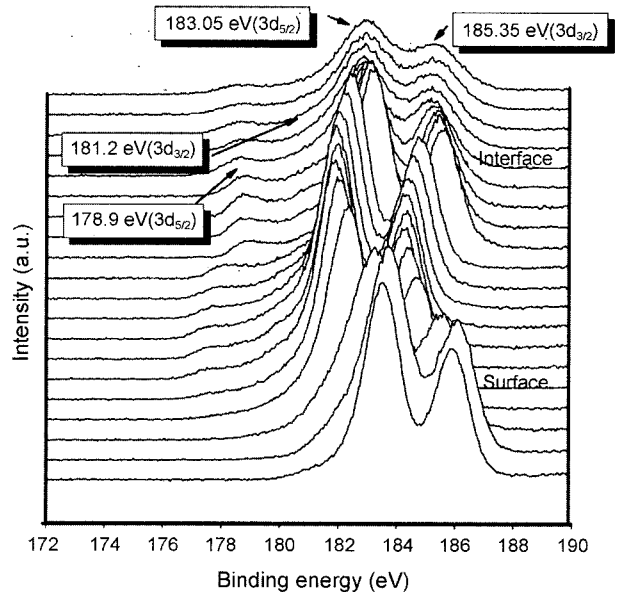


Fig. 8. The high resolution XPS spectra of Zr3d of ZrO_2/Si structure annealed at $800^\circ C$ for 20 min. in the O_2 ambient.

결합인 $Zr\ 3d_{5/2}$, $Zr\ 3d_{3/2}$ 그리고 금속 Zr 의 $Zr\ 3d_{5/2}$, $Zr\ 3d_{3/2}$ 를 나타낸다. 하지만 표면 부근에서 $Zr-O$ 결합의 피크가 $180.45\ eV$ ($Zr\ 3d_{5/2}$)와 $182.85\ eV$ ($Zr\ 3d_{3/2}$)로 변화했다. 이것은 증착 초기에 상당량의 Si 와 산소가 반응하여 Zr 이 남았음을 의미한다. 증착공정이 진행될수록 $Zr-O$ 의 결합이 우선하지만 비정질 ZrO_2 의 약한 결합상태도 나타났다.

Fig. 7은 관상로 산소 분위기에서 $800^\circ C$ 로 20분간 열처리한 ZrO_2/Si 구조의 $Si\ 2p$ 의 XPS spectra를 나타낸 그림

이다. Fig. 5와 비교하면 Fig. 7의 SiO_2 피크가 계면에서 더 강하게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 8은 관상로 산소 분위기에서 $800^\circ C$ 로 20분간 열처리한 ZrO_2/Si 구조의 $Zr\ 3d$ 의 XPS spectra를 나타낸 그림이다. Fig. 6과 비교하면 Fig. 8은 $178.86\ eV$ 의 결합에너지를 갖는 금속 Zr 이 ZrO_2 층의 안쪽에 광범위하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 반면에 $182.6\ eV$ ($Zr\ 3d_{5/2}$), $184.9\ eV$ ($Zr\ 3d_{3/2}$)의 결합에너지를 가지는 $Zr-O$ 의 결합은 계면에서 약한 결합 상태로 나타났지만 이 결합들이 강한 결정

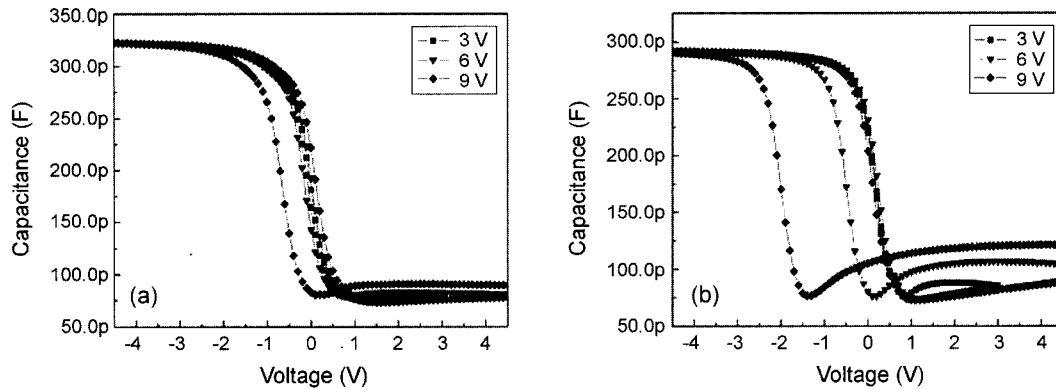


Fig. 9. C-V characteristics of Pt/SBT (260 nm, 800°C)/ZrO₂ (20 nm)/Si structure
 (a) MFIS structure without the ZrO₂ post-annealing process
 (b) MFIS structure with the ZrO₂ annealed at 800°C under the O₂ ambient for 20 min.

상태의 결합에너지로 변화하였다. 그러므로 XPS 결과를 통해서 열처리하지 않았을 때에는 계면에서 적은 양의 SiO₂ 층이 관찰되지만, Zr은 금속 상태로 존재하고, ZrO₂는 비정질 상태의 약한 결합 에너지를 가짐을 알 수 있었다.

반대로 열처리한 ZrO₂/Si 구조에서는 SiO₂와 Zr이 넓게 분포하지만 ZrO₂의 결합 상태는 후열처리 과정에 의해 강했음을 확인 할 수 있었다.

3.5. Pt/SBT/ZrO₂/Si 구조의 전기적 특성

MFIS 구조의 메모리 윈도우 값을 측정하기 위해 capacitance-voltage 특성(C-V)을 측정하였다.

Fig. 9(a)는 ZrO₂ 완충층의 열처리하지 않은 MFIS 구조의 C-V 특성이다. 메모리 윈도우 값은 인가전압 9 V를 가했을 때 약 0.75 V였다.

Fig. 9(b)는 ZrO₂ 완충층의 열처리한 MFIS 구조의 C-V 특성이다. Memory window 값은 인가전압 9 V에서 약 2.2 V였고, 열처리하지 않은 ZrO₂ 완충층 보다 더 높은 값이 나타났다.

이 결과와 이전에 언급되었던 GDS, XPS 결과로부터 ZrO₂층이 열처리 과정을 거침으로써 SBT와 Si 기판 사이의 확산 방지막으로서 역할을 한다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

ZrO₂ 완충층과 SBT 박막은 p-type (111) Si 기판 위에 R.F. magnetron sputtering 방법을 통해 증착하였다. 본 실험에서는 ZrO₂, SBT 박막의 후열처리 과정이 MFIS 구조에 미치는 영향에 대해서 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. GDS 결과로부터 Zr, Sr, Bi, Ta 등의 원소들이 후열처리 과정을 통해 확산이 일어남을 알 수 있었다.

2. XPS 결과에서는 ZrO₂가 후열처리를 거치지 않은 상태에서는 약한 결합 에너지를 가지는 비정질 상태로 존재하였으나 후열처리 과정을 거침으로써 ZrO₂의 결합에너지가 강해짐을 알 수 있었다.

3. MFIS 구조의 전기적 특성 또한 열처리 과정을 통해 향상되었다.

4. Pt/SBT(260 nm, 800°C)/ZrO₂(20 nm)/Si 구조에서 ZrO₂ 열처리를 통해 메모리 윈도우 값이 0.75 V에서 2.2 V로 향상되었다.

5. 이 결과로부터 ZrO₂ 완충층은 후열처리 과정 후에 SBT 박막과 Si 기판 사이에서 확산 방지막의 역할을 했음을 알 수 있었다.

REFERENCES

- G. P. Choi, J. H. Ann, W. J. Lee, T. H. Sung, and H. G. Kim, "Phase Formations and Electrical Properties of doped-PZT/PbTiO₃ Films Deposited by Reactive Sputtering Using Multi-Targets," *Mater. Sci. and Eng. B*, **41** [1] 16-22 (1996).
- T. Hirai, K. Teramoto, T. Goto, and Y. Tarui, "Formation of Metal/Ferroelectric/Insulator/Semiconductor Structure with a CeO₂ Buffer Layer," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** Part 1 [9b] 5219-22 (1994).
- J. H. Kim, S. G. Kang, and H. T. Eun, "Effects of Y₂O₃ Buffer Layer on Ferroelectric Properties of YMnO₃ Thin Films Fabricated on Pt/TiO₂/SiO₂/Si Substrate(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **37** [11] 1097-104 (2000).
- D. R. Lampe, D. A. Adams, M. Austin, M. polinsky, J. Dzimianski, S. Sinharoy, H. Buhay, P. Brabant, and Y. M. Liu, "Process Integration of the Ferroelectric Memory FETs for NDRO FERAM," *Ferroelectrics*, **133** 61-72 (1992).
- Y. G. Son, "Electrical Properties of Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO₃ Thin Film with Various Heat Treatment Conditions(in Korean)," *J. Kor. Ceram. Soc.*, **38** [5] 492-98 (2001).
- B. Cheng, M. Cao, R. Rao, A. Inani, P. V. Voorde, W. M. Green, J. M. C. Stork, Z. Yu, P. M. Zeizoff, and J. C. S.

- Woo, "The Impact of High- κ Gate Dielectrics and Metal Gate Electrodes on Sub-100 nm MOSFETs," *IEEE Trans. Electron Devices*, **46** [7] 1537-42 (1999).
7. A. Mehner, H. Klumper-Westkamp, F. Hoffmann, and P. Mayr, "Crystallization and Residual Stress Formation of Sol-Gel-Derived Zirconia Films," *Thin Solid Film*, **308/309** 363-68 (1997).
 8. K. Goedicke, J.-S. Liebig, O. Zywitzki, and H. Sahn, "Influence of Process Parameters on the Structure and the Properties of ZrO_2 Coatings Deposited by Reactive Pulsed Magnetron Sputtering(PMS)," *Thin Solid Film*, **377/378** 37-42 (2000).
 9. J. S. Kim, H. A. Marzouk, and P. J. Reucroft, "Deposition and Structural Characterization of ZrO_2 and Ytria-Stabilized ZrO_2 Films by Chemical Vapor Deposition," *Thin Solid Film*, **254** 33-8 (1995).
 10. P. Tejedor, C. Ocal, E. Barrena, R. Jimenez, C. Alemany, and J. Mendiola, "Composition-Related Effects of Microstructure on the Ferroelectric Behavior of SBT Thin Films," *Appl. Surf. Sci.*, **175/176** 759-63 (2001).