

플라즈마 표면처리가 $\text{TiO}_2/\text{TiO}_{2-x}$ 저항 변화형 메모리에 미치는 영향

김한상, 김성진 

충북대학교 전자정보대학

Effect of Plasma Treatment on $\text{TiO}_2/\text{TiO}_{2-x}$ Resistance Random Access Memory

Han-Sang Kim and Sung-Jin Kim

College of Electrical and Computer Engineering, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

(Received August 27, 2020; Revised October 15, 2020; Accepted October 16, 2020)

Abstract: In this study, a $\text{TiO}_2/\text{TiO}_{2-x}$ -based resistance variable memory was fabricated using a DC/RF magnetron sputtering system and ALD. In order to analyze the effect of oxygen plasma treatment on the performance of resistance random access memory (ReRAM), the $\text{TiO}_2/\text{TiO}_{2-x}$ -based ReRAM was evaluated by applying RF power to the TiO_{2-x} oxygen-holding layer at 30, 60, 90, 120, and 150 W, respectively. The ReRAM was fabricated, and the electrical and surface area performances were compared and analyzed. In the case of ReRAM without oxygen plasma treatment, the I-V curve had a hysteresis curve shape, but the width was very small, with a relatively high surface roughness of the oxygen-retaining layer. However, in the case of oxygen plasma treatment, the HRS/LRS ratio for the I-V curve improved as the applied RF power increased; stable improvement was also noted in the surface roughness of the oxygen-retaining layer. It was confirmed that the low voltage drive was not smooth due to charge trapping in the oxygen diffusion barrier layer owing to the high intensity ReRAM applied with an RF power of approximately 150 W.

Keywords: TiO_2 , Resistance random access memory, Oxygen plasma treatment, Atomic force microscope

1. 서론

기존 메모리의 단점을 극복하고 고집적도, 비휘발성, 빠른 처리 속도의 장점을 가지는 저항 변화형 메모리가 차세대 메모리 중에 하나로 각광받고 있다 [1-5]. 저항 기반의 메모리 소자는 perovskite 유의 SrZrO_3 [6,7], 강자성체인 PrMnO_3 [8,9], CaMnO_3 [10], 금속 산화물 기반의 NiO [11], TiO_2 [12,13], Cu_xO [14] 등의 다양한 물질로 제작되고 있으며, 이 중에서도 TiO_2 는 넓은 밴드갭, 저렴한 가격, 그리고 외부광원 및 부식과 같은 외부 환경을 견딜 수 있는 지속성 및 안정성이 다른

물질에 비해 뛰어나기 때문에 메모리 소자의 재료로 각광받고 있다 [15-17].

한편 TiO_2 는 carrier 역할을 하는 산소 공공 (oxygen vacancy)을 이용하여 switching 동작을 구현하나, 이동 과정에서 산소 공공들 간의 generation 및 recombination 발생으로 carrier trap, on/off ratio 감소, 전자 이동도 저하로 메모리의 endurance 특성을 열화시키는 문제점이 있다 [16,18,19].

이러한 문제점을 해결하기 위해 $\text{TiO}_2/\text{TiO}_{2-x}$ 의 산소 공공을 정확히 조절할 수 있는 방안이 확립되어야 한다. 이와 관련하여 표면에 플라즈마 표면처리를 추가로 실시함으로써 소자 특성이 향상된 결과가 발표된 바 있지만, 저항 변화형 메모리에 미치는 영향은 명확히 밝혀지지 않고 있다 [20,21]. 본 실험에서는 산소 보유층의 결정 구조를 유지한 상태로 표면 개질 및 표면 친수성을 개선시키기 위해서, 제작한 저항 변화형 메모

✉ Sung-Jin Kim; ksj@chungbuk.ac.kr

리의 핵심적인 역할을 수행하는 TiO_2/TiO_{2-x} 에 플라즈마 표면처리를 적용하였다 [21,22,23].

따라서 본 실험에서는 TiO_2/TiO_{2-x} 박막을 증착한 이후 저항 변화형 메모리의 전기적 특성 향상을 위해 저진공 산소 플라즈마 표면처리를 진행한 후 상부 전극을 증착하여 최종적으로 저항 변화형 메모리를 제작하였다. 또한 산소 플라즈마로 인한 정확한 메커니즘을 규명하기 위해서 소자의 공정 조건을 여러 가지 다양성을 주며 실험을 진행하였다. 저진공 산소 플라즈마에 각각 다른 RF power로 TiO_{2-x} 산소 보유층을 노출 시킴으로써 전기적·표면적·저전압적인 측면에서 최적의 RF power 인가 조건을 분석하였다.

2. 실험 방법

그림 1은 본 논문에서 제작한 금속과 산화물의 구조인 TiO_2/TiO_{2-x} 기반의 소자를 간략하게 나타낸다. 저항 변화형 메모리의 집적도를 향상시키는 방안으로 제시되고 있는 적층 방식을 TiO_2/TiO_{2-x} 에 적용하였다.

두께 약 600 μm 의 heavily doped n-type Si wafer를 기판이자 하부 전극으로 사용하였다. Surface defect (metallic defects, organic particles)을 제거하기 위해 황산, 과수를 3:1로 섞은 SPM cleaning을 약 60분 동안 약 90°C 조건에서 진행하였다.

Si 하부 전극 상에 절연 막을 제작하기 위해서 NCD (LUCIA D100)사의 atomic layer deposition (ALD) system을 사용하여 TiO_2 를 증착하였다. ALD cycle은 Ti의 precursor로써 titanium tetraisopropoxide를 주입하여 1 cycle로 설정하고 1 cycle당 약 0.2 Å 증착으로 총 1,000 cycle을 반복하여 약 5 nm 두께의

TiO_2 박막을 형성하였다. 이후 TiO_2 산소 확산 방지층 위에 산화물 반도체 박막인 rutile 구조를 가지는 TiO_{2-x} 산소 보유층을 증착하기 위해서 더윈과학사의 RF magnetron sputtering system을 사용하여 스퍼터링 공정을 진행하였다. 박막의 균일한 증착을 위해 wafer를 7 rpm의 속도로 회전하였으며, RF power를 약 200 W로 고정된 상태에서 약 10 nm 두께의 TiO_{2-x} 박막을 증착하였다.

산소 플라즈마 표면처리가 TiO_2/TiO_{2-x} 기반의 저항 변화형 메모리에 미치는 영향을 조사하기 위해서 분자빔 에피택시 시스템(molecular beam epitaxy, MBE)에 내장되어 있는 process chamber와 플라즈마 cell을 이용하여 약 3분 동안 약 20 sccm의 산소 주입량을 고정시킨 후, RF power를 각각 약 30, 60, 90, 120, 150 W로 다르게 인가하고 플라즈마 표면처리를 실시하였다. 이온화를 통해 자유 전자가 산소 원자의 최외각 전자가 가속된 자유 전자와 부딪혀 밖으로 방출하게 되고, 산소 원자는 전자를 잃어 양이온으로 변환된다. 플라즈마를 발생시키기 전에 MBE 전체의 진공 상태를 깨지 않고 더욱 고밀도의 진공 상태에서 시료를 배치하기 위해서 load lock chamber를 사용하였다. Process chamber 환경은 약 10 sccm으로 주입한 산소 분위기로 유지되었으며, 진공도는 약 3.0×10^{-3} torr로 진공 상태에서 플라즈마를 발생시켰다.

이후, TiO_{2-x} 산소 보유층 상부에 shadow mask를 사용하여 약 100 nm 두께의 MoW source/drain 전극을 DC magnetron sputtering 공정을 통해 증착하였다. 최종적으로 형성된 MoW 상부 전극의 가로와 세로 길이는 각각 약 $100 \times 100 \mu m$ 의 정사각형 형태를 띠고 있으며, 하나의 wafer에 각각 16개의 TiO_2/TiO_{2-x} 기반의 저항 변화형 메모리 소자를 배치하였다.

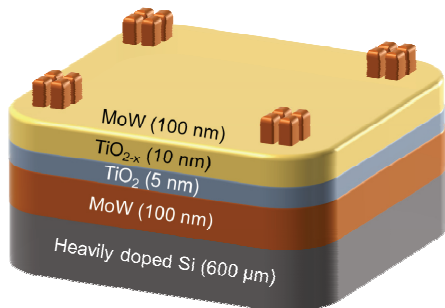


Fig. 1. Structure of TiO_2/TiO_{2-x} -based ReRAMs processed oxygen plasma treatment with RF power 30, 60, 90, 120, 150 W, respectively.

Table 1. Summary of the electrical average HRS and LRS current, HRS:LRS ratio of TiO_2/TiO_{2-x} ReRAMs.

RF power (W)	Average HRS current ($\times 10^{-6}$)	Average LRS current ($\times 10^{-2}$)	HRS:LRS ratio ($\times 10^3$)
As-dep.	8.26	2.47	2.99
30	5.78	3.38	5.85
60	4.19	2.94	7.02
90	5.48	4.62	8.43
120	2.55	2.79	10.9
150	2.91	7.96	27.4

최종적으로 제작한 저항 변화형 메모리에 산소 플라즈마 표면처리가 미치는 영향을 조사하기 위해서, 전기적 및 표면적 성능을 측정하고 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

그림 2는 drain voltage를 0~5 V로 double sweep으로 인가하여, HRS 상태에서 가장 낮은 current 값과 LRS 상태에서 가장 높은 current 값을 측정하여 계산한 결과를 나타낸다. 프로브 스테이션(MSTECH 8000)을 이용하여 저항 변화형 메모리 소자에 접촉하였으며, 반도체 파라미터 측정기(Keithley 4200A)를 이용하여 산소 플라즈마 표면처리를 진행하지 않은 저항 변화형 메모리 및 RF power를 각각 약 30, 60, 90, 120, 150 W로 진행한 저항 변화형 메모리 소자의 HRS:LRS 비율을 측정 계산하였다.

그 결과 플라즈마를 진행하지 않은 저항 변화형 메모리 소자의 경우에는, 최대치와 최소치를 제외한 HRS 평균이 8.26×10^{-6} 이며, 최대치와 최소치를 제외한 LRS 평균이 2.47×10^{-2} 로, HRS:LRS ratio는 2.99×10^3 로 측정 계산되었다. RF power를 30 W로 진행한 저항 변화형 메모리 소자는 최대치와 최소치를 제외한 HRS 평균이 5.78×10^{-6} 이며, 최대치와 최소치를 제외한 LRS 평균이 3.38×10^{-2} 로, HRS:LRS ratio는 5.85×10^3 으로

측정 계산되었다. RF power를 60 W로 진행한 저항 변화형 메모리 소자는 최대치와 최소치를 제외한 HRS 평균이 4.19×10^{-6} 이며, 최대치와 최소치를 제외한 LRS 평균이 2.94×10^{-2} 로, HRS:LRS ratio는 7.02×10^3 으로 측정 계산되었다. RF power를 90 W로 진행한 저항 변화형 메모리 소자는 최대치와 최소치를 제외한 HRS 평균이 5.48×10^{-6} 이며, 최대치와 최소치를 제외한 LRS 평균이 4.62×10^{-2} 로, HRS:LRS ratio는 8.43×10^3 으로 측정 계산되었다. RF power를 120 W로 진행한 저항 변화형 메모리 소자는 최대치와 최소치를 제외한 HRS 평균이 2.55×10^{-6} 이며, 최대치와 최소치를 제외한 LRS 평균이 2.79×10^{-2} 로, HRS:LRS ratio는 1.09×10^4 로 측정 계산되었다. RF power를 150 W로 진행한 저항 변화형 메모리 소자는 최대치와 최소치를 제외한 HRS 평균이 2.91×10^{-6} 이며, 최대치와 최소치를 제외한 LRS 평균이 7.96×10^{-2} 로, HRS:LRS ratio는 2.74×10^4 로 측정 계산되었다.

결과적으로 저항 변화형 메모리의 hysteresis 특성이 구현됨을 확인하였다. 산소 플라즈마 표면처리를 진행하지 않은 저항 변화형 메모리 소자는 positive 영역에서 상대적으로 작은 폭의 hysteresis 곡선 형태를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 반면에 산소 플라즈마 표면처리를 각각 약 30, 60, 90, 120, 150 W로 진행한 저항 변화형 메모리에서는 인가한 RF power가 높아질수록 우수한 형태의 hysteresis를 확인할 수 있다.

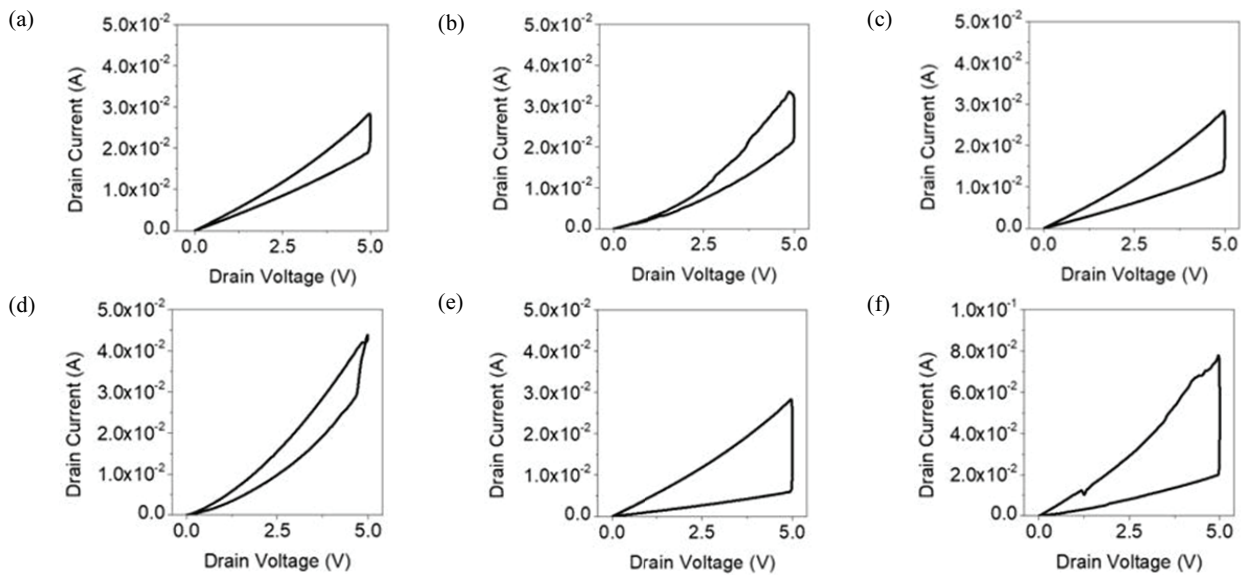


Fig. 2. I-V curves applied 0 to 5 V of the $\text{TiO}_2/\text{TiO}_{2-x}$ ReRAMs manufactured treated oxygen plasma through MBE at (a) as-dep., (b) 30, (c) 60, (d) 90, (e) 120, and (f) 150 W, respectively.

이는 TiO_{2-x} 산소 보유층 표면의 defect 및 계면 저항으로 인해 전자가 트랩되어 있으며 RF power의 증가에 따라 트랩 밀도 감소를 통해 캐리어 농도가 증가하면서, 메모리 특성이 개선되는 것으로 판단된다 [24,25].

그림 3은 산소 플라즈마 표면처리를 진행하지 않은 경우 및 각각 RF power를 약 30, 60, 90, 120, 150 W로 진행한 저항 변화형 메모리 소자의 경우에 대해서 TiO_{2-x} 산소 보유층에 대해서 박막 표면 거칠기를 측정하였다. 산소 플라즈마 표면처리를 진행하지 않은 TiO_{2-x} 산소 보유층은 표면 내에 울퉁불퉁하게 균일도가 굉장히 하락되어 표면 배치가 불규칙한 부분을 발견할 수 있다. 또한 표면 거칠기인 root mean square (RMS) 값이 약 1.56 nm으로 상대적으로 거친 부분을 확인할 수 있다.

산소 플라즈마 표면처리를 각각 RF power 30, 60, 90, 120 W로 진행한 TiO_{2-x} 산소 보유층은 RMS 값이 각각 0.93, 0.79, 0.36, 0.27 nm로, 처리 전 표면에 잔존하던 미세입자와 저분자 물질이 효과적으로 증발하여 균일도가 높고 평탄하다. 특히 산소 플라즈마 표면처리를 약 150 W의 RF power로 진행한 TiO_{2-x} 산소 보유층은 RMS가 약 0.23 nm로 가장 크게 감소된 것을 확인할 수 있다. 산소 보유층 표면상의 거칠기가 클수록 전자의 이동을 방해하는 계면 트랩 전하(interface trap charge) 현상이 일어나고 누설 전류(leakage current) 발생에 더욱 일조할 수 있다. 또한 산소 플라즈마 표면처리 공정은 이와 같이 표면의 균일도를 향상시킴으로써 거칠기 평탄화로 빛의 산란을 저하시켜서 광투과

도 향상에 영향을 미친다 [26]. 따라서 광투과도의 영향을 받음으로써, 전도대 내에 페르미 준위를 증가시키고 band-filling effect로 인한 전하 농도의 상승과 함께 에너지 밴드갭의 확장에 영향을 미치기 때문에, absorption tail 변화에 기인된 디바이스의 전기적 특성을 향상시킬 수 있다 [27].

결과적으로 산소 플라즈마 표면처리를 진행한 후 grain의 크기가 눈에 띄게 작아지는 것을 볼 수 있으며, RF power의 값이 높아질수록 전반적으로 grain의 크기는 점차 작아지고 결정입계(grain boundary)가 비교적 명확해지는 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 프로브 스테이션(MSTECH 8000)을 이용하여 저항 변화형 메모리 소자에 접촉하였으며, 반도체 파라미터 측정기(Keithley 4200A)를 이용하여 산소 플라즈마 표면처리를 진행하지 않은 저항 변화형 메모리 및 각각 RF power를 약 30, 60, 90, 120, 150 W로 진행한 저항 변화형 메모리 소자에 drain voltage를 0~0.3 V로 double sweep으로 인가하여 저전압에서도 정상적으로 구동되는지에 대해서 분석한 결과를 나타낸다.

저항 변화형 메모리 소자에 저전압인 0.3 V까지를 인가할 때 정상 작동 여부를 평가하였으며, 저항 변화형 메모리 소자가 모두 정상적으로 작동하는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 산소 플라즈마 표면처리를 진행하지 않은 저항 변화형 메모리의 경우에는 저전압을 인가하였을 때 정상적으로 구동이 되지만, 상대적으로 HRS:LRS ratio 값이 매우 낮고 불완전한 hysteresis 곡선 형태가 확인된다. 반면에 산소 플라즈마 표면처리

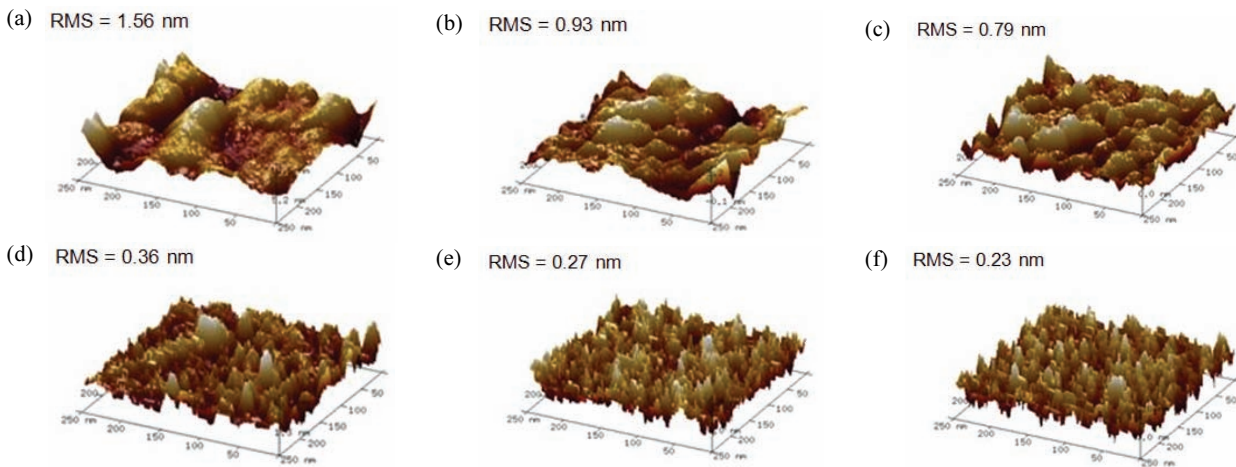


Fig. 3. AFM images at 250×250 magnification of the TiO_{2-x} thin-films treated oxygen plasma through MBE at (a) as-dep., (b) 30, (c) 60, (d) 90, (e) 120, and (f) 150 W, respectively.

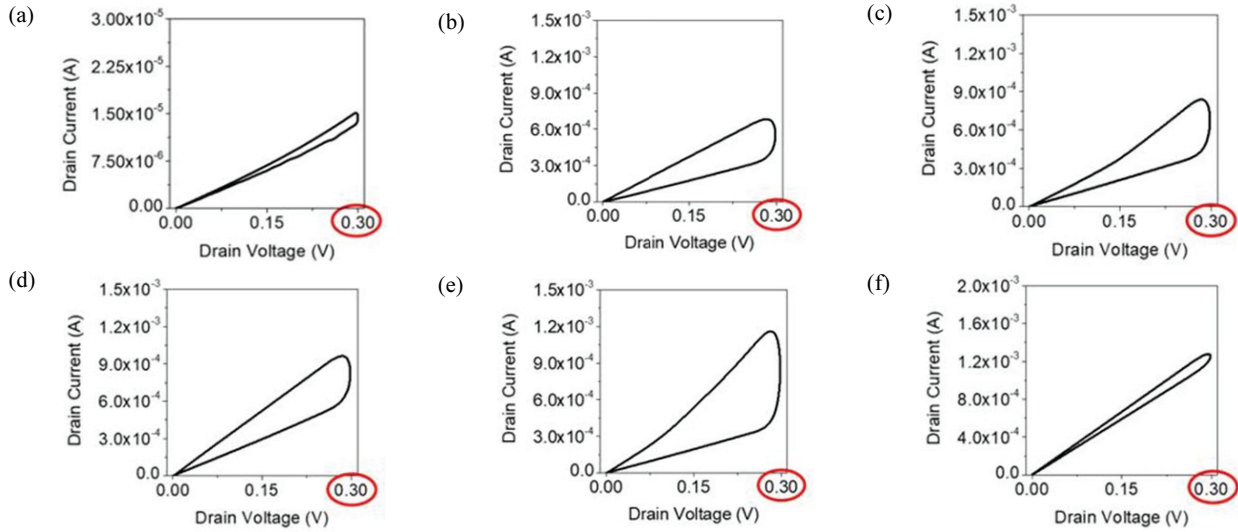


Fig. 4. I-V curves applied 0 to 0.3 V (Low voltage) of the $\text{TiO}_2/\text{TiO}_{2-x}$ ReRAMs manufactured treated oxygen plasma through MBE at (a) as-dep., (b) 30, (c) 60, (d) 90, (e) 120, and (f) 150 W, respectively.

를 진행한 저항 변화형 메모리의 경우에는 RF power 약 120 W로 진행한 소자까지 전반적으로 일정하게 HRS:LRS ratio 값이 우수하게 개선되고 있다.

하지만 RF power를 약 150 W로 인가하고 산소 플라즈마 표면처리를 진행한 저항 변화형 메모리 소자는 오히려 산소 플라즈마 표면처리를 진행하지 않은 저항 변화형 메모리 소자의 I-V curve보다 전기적 성능이 악화되었음을 확인할 수 있다. 이는 TiO_{2-x} 산소 보유층을 형성한 이후 산소 플라즈마 표면처리 시에 약 150 W인 높은 RF power를 인가함에 따라서 산소 확산 방지층에서의 전하 trapping 발생 때문에 저전압에서의 전기적 성능 현상 악화가 기인되었다고 판단된다 [28,29]. 따라서 산소 플라즈마 표면처리를 진행한 결과로, I-V curve 상의 전반적인 전기적 성능을 크게 개선시킬 수 있지만, 최적화된 RF power 값은 약 120 W이며 150 W로 증가함에 따라 저전압에서의 저항 변화형 메모리 구동 성능은 산소 플라즈마 표면처리를 진행하지 않은 저항 변화형 메모리보다 악화되었다.

4. 결론

본 논문에서는 DC/RF magnetron sputtering system 과 ALD를 이용하여 $\text{TiO}_2/\text{TiO}_{2-x}$ 기반의 저항 변화형 메모리를 제작하였다. 산소 플라즈마 표면처리가 저항 변화형 메모리의 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해

서 TiO_{2-x} 산소 보유층에 RF power를 각각 약 30, 60, 90, 120, 150 W로 인가하여 $\text{TiO}_2/\text{TiO}_{2-x}$ 기반의 저항 변화형 메모리를 제작하였고 전기적·표면적 성능을 비교 분석하였다. 산소 플라즈마 표면처리를 진행하지 않은 저항 변화형 메모리의 경우에는, I-V curve 에서 hysteresis 곡선 형태를 띠고 있지만, 매우 작은 폭이며 산소 보유층의 표면도 상대적으로 가장 높은 값의 표면 거칠기를 확인할 수 있었다.

하지만 산소 플라즈마 표면처리를 진행할 경우에는 인가한 RF power의 값이 높아질수록 I-V curve 상에서 HRS:LRS ratio 값도 개선되었으며, 플라즈마 표면처리를 진행한 산소 보유층의 표면도 거칠기가 안정적으로 개선되었다. 하지만 RF power를 약 150 W로 인가한 저항 변화형 메모리는 너무 높은 세기로 인해서 산소 확산 방지층에서의 전하 trapping 발생으로 인해서 저전압 구동이 완만하지 않음을 확인하였다.

ORCID

Sung-Jin Kim

<https://orcid.org/0000-0001-7739-5328>

감사의 글

이 논문은 충북대학교 국립대학육성사업(2020)지원을 받아 작성되었음.

REFERENCES

- [1] S. J. Song, J. Y. Seok, J. H. Yoon, K. M. Kim, G. H. Kim, M. H. Lee, and C. S. Hwang, *Sci. Rep.*, **3**, 3443 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1038/srep03443>]
- [2] M. Son, J. Lee, J. Park, J. Shin, G. Choi, S. Jung, W. Lee, S. Kim, S. Park, and H. Hwang, *IEEE Electron Device Lett.*, **32**, 1579 (2011). [DOI: <https://doi.org/10.1109/LED.2011.2163697>]
- [3] Q. Liu, J. Sun, H. Lv, S. Long, K. Yin, N. Wan, Y. Li, L. Sun, and M. Liu, *Adv. Mater.*, **24**, 1844 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201104104>]
- [4] J. W. Choi, Y. S. Mo, and H. J. Song, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 658 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.10.658>]
- [5] J. H. Kim, K. H. Nam, and H. B. Chung, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **27**, 81 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2014.27.2.81>]
- [6] N. Singh, M. Seshadri, M. S. Pathak, and V. Singh, *Solid State Sci.*, **87** (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2018.09.003>]
- [7] K. Ahmad, P. Kumar, and S. M. Mobin, *Nanoscale Adv.*, **2**, 502 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1039/C9NA00573K>]
- [8] A. Sahoo, P. Padhan, and W. Prellier, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 36423 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b11930>]
- [9] S. Mansouri, S. Jandl, A. Mukhin, V. Y. Ivanov, and A. Balbashov, *Sci. Rep.*, **7**, 13796 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12714-8>]
- [10] R. U. Chandrasena, W. Yang, Q. Lei, M. U. Delgado-Jaime, K. D. Wijesekara, M. Golalikhani, B. A. Davidson, E. Arenholz, K. Kobayashi, M. Kobata, F.M.F. de Groot, U. Aschauer, N. A. Spaldin, X. Xi, and A. X. Gray, *Nano Lett.*, **17**, 794 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.6b03986>]
- [11] T. Abzieher, S. Moghadamzadeh, F. Schackmar, H. Eggers, F. Sutterlütli, A. Farooq, D. Kojda, K. Habicht, R. Schmager, A. Mertens, R. Azmi, L. Klotz, J. A. Schwenzler, M. Hetterich, U. Lemmer, B. S. Richards, M. Powalla, and U. W. Paetzold, *Adv. Energy Mater.*, **9**, 1802995 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1002/aenm.201802995>]
- [12] J. Low, B. Dai, T. Tong, C. Jiang, and J. Yu, *Adv. Mater.*, **31**, 1802981 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201802981>]
- [13] C. Gao, T. Wei, Y. Zhang, X. Song, Y. Huan, H. Liu, M. Zhao, J. Yu, and X. Chen, *Adv. Mater.*, **31**, 1806596 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201806596>]
- [14] X. Zhou, W. Guo, J. Fu, Y. Zhu, Y. Huang, and P. Peng, *Appl. Surf. Sci.*, **494**, 684 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.07.159>]
- [15] A. Meng, L. Zhang, B. Cheng, and J. Yu, *Adv. Mater.*, **31**, 1807660 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201807660>]
- [16] J. Singh, S. A. Khan, J. Shah, R. K. Kotnala, and S. Mohapatra, *Appl. Surf. Sci.*, **422**, 953 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.06.068>]
- [17] A. Kogo, Y. Sanehira, Y. Numata, M. Ikegami, and T. Miyasaka, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10**, 2224 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b16662>]
- [18] L. Hüttenhofer, F. Eckmann, A. Lauri, J. Cambiasso, E. Pensa, Y. Li, E. Cortés, I. D. Sharp, and S. A. Maier, *ACS Nano*, **14**, 2456 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b09987>]
- [19] Y. Yang, L. C. Yin, Y. Gong, P. Niu, J. Q. Wang, L. Gu, X. Chen, G. Liu, L. Wang, and H. M. Cheng, *Adv. Mater.*, **30**, 1704479 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201704479>]
- [20] J. Nam, J. H. Kim, C. S. Kim, J. D. Kwon, and S. Jo, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **12**, 126648 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.9b18660>]
- [21] H. He, D. Huang, W. Pang, D. Sun, Q. Wang, Y. Tang, X. Ji, Z. Guo, and H. Wang, *Adv. Mater.*, **30**, 1801013 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201801013>]
- [22] L. Zhang, Z. Chen, J. J. Yang, B. Wysocki, N. McDonald, and Y. Chen, *Appl. Phys. Lett.*, **102**, 153503 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4802206>]
- [23] L. Michalas, S. Stathopoulos, A. Khiat, and T. Prodromakis, *Appl. Phys. Lett.*, **113**, 143503 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5040936>]
- [24] Y. Beilliard, F. Paquette, F. Brousseau, S. Ecoffey, F. Alibert, and D. Drouin, *AIP Adv.*, **10**, 025305 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5140994>]
- [25] A. Mazady and M. Anwar, *IEEE Trans. Electron Devices*, **61**, 1054 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TED.2014.2304436>]
- [26] P. F. Cai, J. B. You, X. W. Zhang, J. J. Dong, X. L. Yang, Z. G. Yin, and N. F. Chen, *J. Appl. Phys.*, **105**, 083713 (2009). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3108543>]
- [27] Y. C. Hong, C. U. Bang, D. H. Shin, and H. S. Uhm, *Chem. Phys. Lett.*, **413**, 454 (2005). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2005.08.027>]
- [28] D. Sakellaropoulos, P. Bousoulas, and D. Tsoukalas, *J. Appl. Phys.*, **126**, 044501 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5094242>]
- [29] H. Nili, A. F. Vincent, M. Prezesio, M. R. Mahmoodi, I. Kataeva, and D. B. Strukov, *IEEE Trans. Nanotechnol.*, **19**, 344 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TNANO.2020.2982128>]