

HfO₂, TiO₂ 와 Ta₂O₅ RRAM Device 의 전기적 특성 비교

김홍창, 하영수, 박준희

나노융합스쿨, 한림대학교, 강원도 춘천시 한림대학길 1

E-mail: june931027@gmail.com

금속-절연막-금속의 패턴을 가지는 소자 특성 분석 시뮬레이션을 진행하였다. 전극은 백금, 절연막으로는 보편적으로 RRAM 소자 연구에 사용되는 HfO₂와 TiO₂, Ta₂O₅를 사용했으며 절연막의 두께, 트랩의 수, 트랩의 깊이 등을 변수로 하여 각 RRAM 소자의 전류 특성을 비교하였다. 트랩의 수, 트랩의 깊이를 변화시켰을 때, 각각의 물질 내에서는 RRAM을 작동시키기 위한 Transition Voltage와 Transition Field가 두께에 따라 차이가 거의 없었다. 하지만, 절연막의 두께가 얇아질수록, Transition Voltage는 작아지고 전류 밀도는 커지므로 결과적으로, 저항이 감소함을 알 수가 있었다. 절연막으로써 사용되는 세 물질을 비교했을 때, Ta₂O₅가 다른 물질보다 더 좋은 특성을 가짐을 확인 할 수 있었다.

서론

현재 금속산화물인 절연막을 이용하여 MIM구조로 되어있는 RRAM Device는 가해주는 전압에 따라서 나타나는 저항의 변화를 이용하여 데이터를 저장하는 방식으로 장치의 구동 방식은 다양하다. 이번 연구에서는 양 전압을 가해주었을 때 절연층의 이온의 이동에 따라 생성되는 빈 공간들이 전극과 전극을 이어주는 필라멘트를 형성하게 되고 그에 따라 전류가 흐르게 되어 초기상태에서 저항이 작아지는 ON-State로 바뀌는 메모리 특성을 가진 장치를 이용하였다. 이러한 RRAM Device는 플래시 메모리보다 프로그램 동작이 빠르며, 낮은 전압에서 동작이 가능하다. 또한, 간단한 구조로 구성되어 있기 때문에 공정상의 결함을 확연히 줄일 수 있으므로 차세대 비휘발성 메모리 중 하나으로써 현재 널리 연구되고 있다.[1]

따라서 본 논문에서는 RRAM의 절연막으로 사용되는 물질을 HfO₂와 TiO₂, Ta₂O₅로 사용하였고 각각의 물질에 대해 트랩 깊이, 트랩의 수 등 다양한 변수를 통한 3D-TAT Modeler Simulation 결과를 바탕으로 RRAM Device 특성을 비교하고자 한다.

이론 및 계산방법

본 논문에서는 Edison 나노물리센터에서 제공하는 MIM 구조에서 트랩을 통한 터널링 전류인 TAT(Trap-Assisted Tunneling)를 측정하는 3D-TAT Modeler SW를 이용하였다. 또한, 이 Simulation에서는 Trap에 갇힌 전자가 주변의 열에너지를 흡수하면서 Trap으로부터 빠져나가는 Poole-Frenkel Effect에 의한 전류의 발생을 구현 할 수 있었다. 서론에서 언급한 RRAM에서 절연막 내에 있는 이온의 이동에 따라 생성되는 필라멘트가 형성된 후, 흐르는 전류가 트랩에 통한 터널링에 의해 생성된 전류로 인식하였다. TAT가 PF보다 누설전류에 대한 영향력이 지배적일 때에 필라멘트 형성에 의한 전류

	HfO ₂	TiO ₂	Ta ₂ O ₅
Energy gap (eV)	5.8	3.5	4.4
Dielectric constant (F/m)	22	80	25
Electron Affinity (eV)	2.1	1.6	3.2
$ \Psi_B $ (eV)	3	3.5	1.9

Table 1. 3D-TAT Modeler Simulation에서 절연막으로 사용되는 물질의 특성. 전극 물질로 사용된 백금의 일함수(Work Function)는 5.1eV이다. [2-7]의 발생을 지배적인 것으로 판단하여 이 때의 전압을 Transition Voltage라고 명명하였다. 이를 바탕으로 절연막 내의 트랩의 수, 트랩 깊이, 절연막 두께에 따라 Transition Voltage 및 전류밀도를 구하기 위해 소프트웨어를 사용하여 Simulation을 진행하였다. 본 연구에서 ψ_B 는 전극 물질로 사용한 Pt의 일함수(Work Function)와 절연막의 전자친화도(Electron Affinity)의 차이이다. Table 1은 Simulation에서 절연막 물질로 사용된 HfO₂, TiO₂와 Ta₂O₅의 특성을 나타낸다. 절연막의 두께는 10~30nm로, 트랩의 수는 10^{16} , 10^{18} , $10^{20}cm^{-3}$ 로 설정하고, 트랩 깊이를 0.1, 0.2, 0.3eV로 설정하였다. 세 개의 값 중에서 두 개의 값을 고정시키고, 하나의 값만 변화시키면서 RRAM Device 특성이 어떻게 달라지는지 분석하였다.

결과 및 논의

본 연구에서는 Fig. 1은 절연막의 종류에 따른 I-V Curve의 변화를 나타내고 있다. 단, 트랩 깊이와 트랩의 수를 각각 0.1eV과 $10^{16}cm^{-3}$ 로 고정시켰다. 이 때, 누설전류가 물질에 따라 다르게 나타나고 있다는 점을 주목할 수 있다. 먼저 절연막의 두께가 같다는 조

건하에 전류밀도를 비교한 결과, Ta₂O₅, HfO₂ 그리고 TiO₂ 순으로 전류 밀도가 작아지는 것을 관찰할 수 있다. 그 이유는 Fig. 3에서 자세히 확인할 수 있다. 본 연구에서 사용한 Simulation은 정공(hole)의 영향을 제외하고 전자(electron)의 영향만을 계산하여 진행했기 때문에, 전자의 영향을 중점으로 분석해야만 한다. 따라서, 백금과 절연막 사이의 Barrier 크기가 전류 밀도에 가장 크게 영향을 기여함을 알 수 있기 때문에 Barrier 크기가 가장 작은 것이 전자의 영향이 가장 큰 것을 확인할 수 있다.

또한, Fig. 1에서 절연막의 두께에 따른 Transition Voltage를 관찰 했을 때, Transition Voltage는 두께가 증가할수록 증가하고 누설전류는 감소하게 된다. 단, Fig. 2에서 HfO₂와 TiO₂의 Transition Voltage가 절연막의 두께가 18nm 이하에서만 관찰이 되고, Ta₂O₅의 경우에는 17nm 이하에서만 관찰된 것을 알 수 있다. 따라서, HfO₂와 TiO₂의 RRAM Device가 Ta₂O₅의 Device보다 전류 관점이 아닌 Switching 관점에서 보면 보다 수월하게 구동 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 Ta₂O₅의 트랩 깊이, 트랩의 수에 따라 3D-TAT SW를 이용하여 Simulation을 진행한 Transition Field에 대한 그래프이다. 먼저 Fig. 4 (a)는 Trap Depth를 고정시킨 후 Trap Concentration과 절연막 두께를 변화시켜 관찰하였고 Fig. 4 (b)는 Trap Concentration을 고정시킨 후 Trap Depth와 절연막 두께를 변화시켜 관찰하였다. 절연막으로 Ta₂O₅를 사용한 경우 약간의 오차가 있지만, Fig. 4 (a)와 Fig. 4 (b)에서 Transition Field가 290MV/m로 변화가 거의 없었다. 마찬가지로 HfO₂와 TiO₂를 사용한 경우에도 Transition Field가 각각 275MV/m, 270MV/m로 변화가 거의 없음을 Simulation을 통해서 확인할 수 있었다. 하지만, $Transition\ Field = \frac{Transition\ Voltage}{Insulator\ Thickness}$ 이므로 두께가 증가함에 따라 Transition Voltage는 증가하게 되고

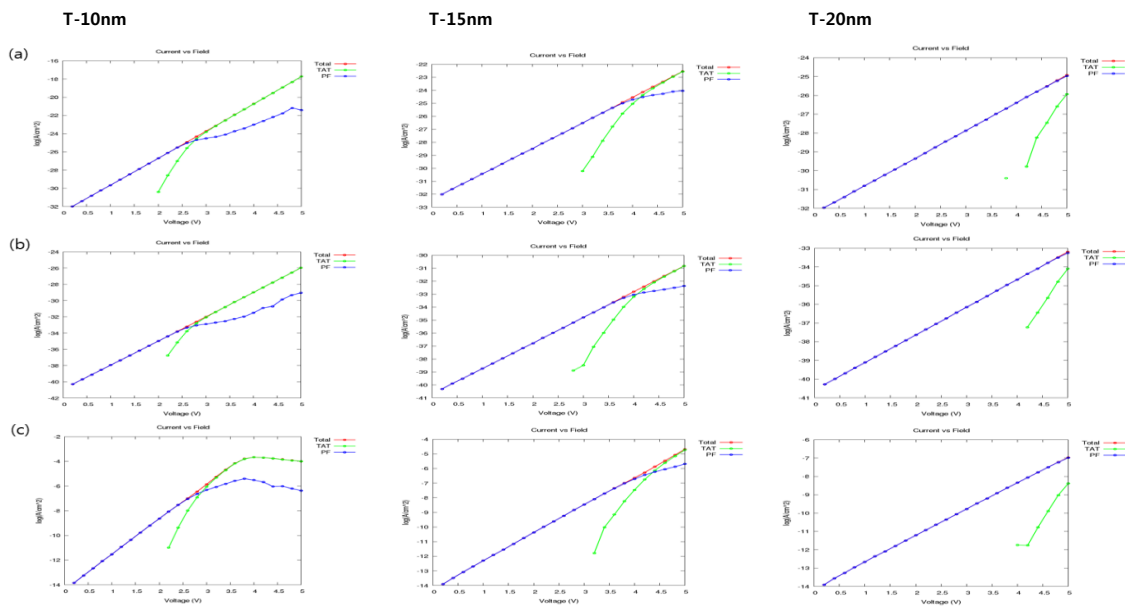


Figure 1. (a) HfO₂의 두께에 따른 I-V Curve, (b) TiO₂의 두께에 따른 I-V Curve, (c) Ta₂O₅의 두께에 따른 I-V Curve

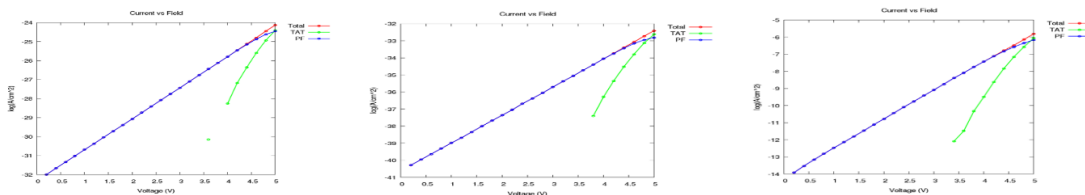


Figure 2. HfO₂(18nm), TiO₂(18nm)와 Ta₂O₅(17nm)의 Transition Voltage

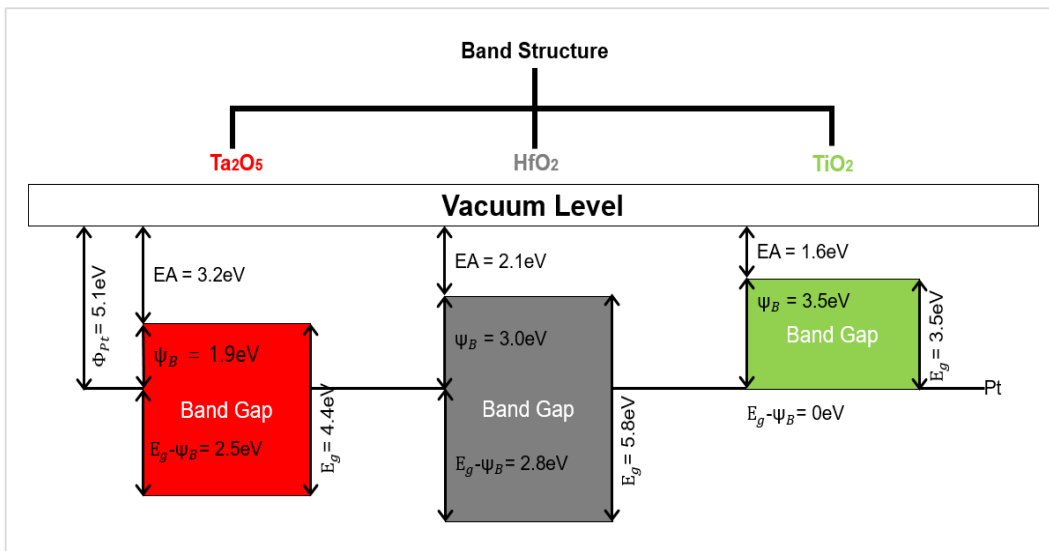


Figure 3. HfO₂, TiO₂와 Ta₂O₅의 Band 구조

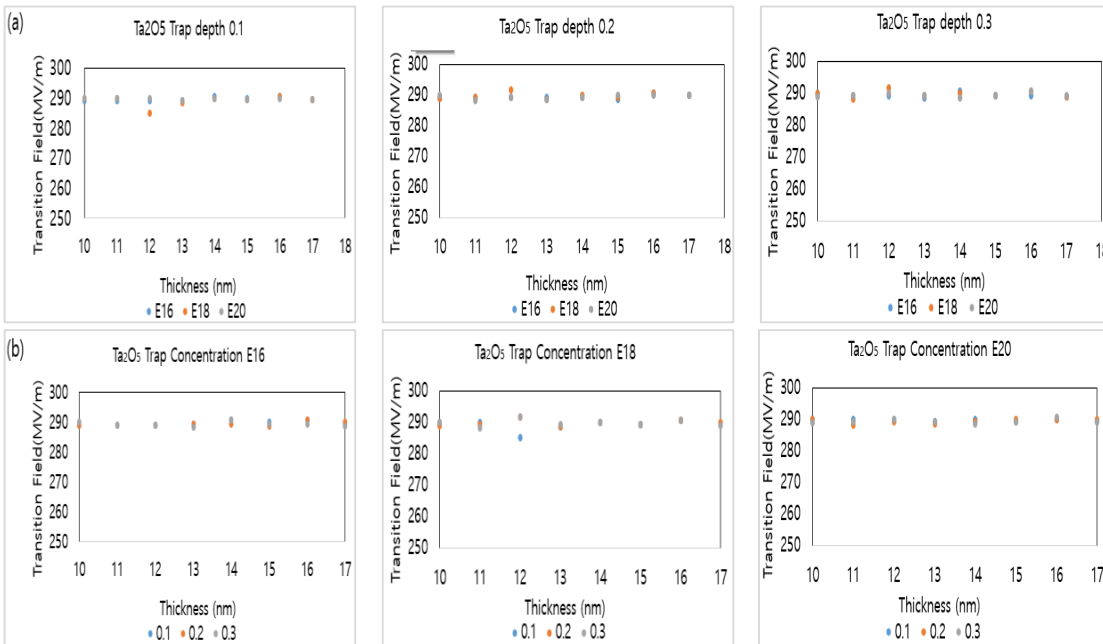


Figure 4. Ta₂O₅의 Transition Field 에 대한 그래프. (a) 트랩 깊이 고정, (b) 트랩의 수 고정

각 두께에 해당되는 Transition Field 값의 변화가 거의 없기 때문에, Fig. 4 (a)와 Fig. 4 (b) 조건에서 Transition Voltage를 측정했을 때, 각 두께에 해당하는 Transition Voltage 값도 변화가 없음을 알 수 있다. 따라서, 두께에 따른 Transition Voltage를 측정하는 3D-TAT Modeler Simulation을 진행하여 일정한 값의 Transition Field를 확인 할 수 있었으며, 이 값은 물질의 고유의 값으로 예측할 수 있었다.

결론

본 논문은 MIM 구조에서 트랩을 통한 터널링 전류인 TAT를 측정하는 3D-TAT Modeler SW를 이용하여 필라멘트가 형성되어 RRAM Device가 저항이 작아지며 Switching on 되는 상황을 모사하였다.

트랩 깊이와 트랩의 수가 변함에 따라 Transition Voltage와 Transition Field의 변화는 크게 얻을 수 없었지만, Ta₂O₅가 다른 물질에 비해서 절연막의 두께가 같을 때, 백금과의 전도띠의 차이가 가장 작아서 전류

밀도가 가장 우수하였다. 또한, 절연막의 두께에 대해서 비교해 보았을 때에 Transition Voltage에 대한 특성은 HfO₂과 TiO₂가 Ta₂O₅보다 미세하지만 수월하게 RRAM Device를 Switching on 할 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012M3C1A6035684)

참고문헌

- [1] Electronic Parts N Components, <http://www.epnc.co.kr/news/articleView.html?idxno=8948> (accessed Jan. 17, 2019).
- [2] Zhu, W. J., Tamagawa, T., Gibson, M., Furukawa, T. & Ma,

T. P. Effect of Al Inclusion in HfO₂ on the Physical and Electrical Properties of the Dielectrics. IEEE ELECTRON DEVICE Lett. 23, 649–651 (2002).

[3] Zheng, W., Bowen, K. H., Li, J., Da, I. & Gutowski, M. Electronic Structure Differences in ZrO vs HfO. J. Phys. Chem. 109, 11521–11525 (2005).

[4] Wu, H., Wang, L. & Introduction, I. Electronic structure of titanium oxide clusters: TiO_y (y=1-3) and (TiO₂)_n (n=1-4). Am. Inst. Phys. 107, 8221–8228 (1997).

[5] V. Y.-Q. Zhuo, Y. Jiang, M. H. Li, E. K. Chua, Z. Zhang et al. Band alignment between Ta₂O₅ and metals for resistive random access memory electrodes engineering. Appl. Phys. Lett. 102, 062106 (2013).

[6] Robertson, J. High dielectric constant oxides. Eur. Phys. J. Appl. Phys. 28, 265–291 (2004).

[7] CRC Handbook of Chemistry and Physics version 2008, p. 12–114.