

## 유도 결합 플라즈마를 이용한 TaN 박막의 건식 식각 특성

진 러<sup>1</sup>, 주영희<sup>1</sup>, 우종창<sup>1</sup>, 김한수<sup>1</sup>, 최경록<sup>1</sup>, 김창일<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 중앙대학교 전자전기공학부

### The Etching Characteristics of the TaN Thin Films Using Inductively Coupled Plasma

Chen Li<sup>1</sup>, Young-Hee Joo<sup>1</sup>, Jong-Chang Woo<sup>1</sup>, Han-Soo Kim<sup>1</sup>,  
Kyung-Rok Choi<sup>1</sup>, and Chang-Il Kim<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

(Received August 10, 2012; Revised October 6, 2012; Accepted November 21, 2012)

**Abstract:** In this paper, we investigated the etching characteristics of the TaN thin films and the surface reaction of TaN thin films after etching process. The etching characteristics of the TaN thin films were carried out using inductively coupled plasma (ICP). The etch rate and the selectivity of TaN to SiO<sub>2</sub> and TaN to PR were measured by varying the gas mixing ratio, RF power, DC-bias voltage, and process pressure in CF<sub>4</sub>-based plasma. The surface reaction of TaN thin films were determined by x-ray photoelectron spectroscopy (XPS).

**Keywords:** TaN, ICP, XPS, Etch, CF<sub>4</sub>

#### 1. 서 론

현재 계속되는 트랜지스터 크기의 감소로 인하여 게이트 산화물의 두께가 줄어들고 있다. 트랜지스터 크기의 감소는 터널링 현상을 증가시키고 이로 인해 소자의 오작동을 유발시킨다. 이런 현상을 줄이기 위하여 게이트 산화막을 고유전막으로 대체하려는 연구가 진행 중이며, 금속/고유전막 구조의 트랜지스터 연구가 활발히 진행 중이다. 금속 물질로는 비저항과 전자 이주 현상이 낮은 구리가 많이 연구되어지고 있다. 하지만 구리는 쉽게 확산되는 성질이 있기 때문

에 확산 방지막을 필요로 하는 단점이 있다. 확산 방지막으로 사용되는 물질로는 TiN, TaN, SiN 등과 같은 금속 질화물이다. 그 중 TaN은 높은 열적 안정성, 좋은 접착성, 높은 녹는점, 낮은 저항과 같은 장점을 가지고 있고, 금속/고유전막 구조에서 전극으로도 사용될 수 있기 때문에 지속적인 연구가 진행되고 있다 [1-4].

소자의 미세화가 진행될수록 식각 공정은 중요한 공정과정 중 하나로 대두되고 있다. 게이트의 폭이 줄어들어 따라 전극의 폭도 줄어들기 때문에 플라즈마를 이용한 미세 패터닝의 식각 연구가 중요하다. 하지만 플로린 계열의 가스를 이용한 TaN 박막의 정확한 식각 메커니즘은 아직 연구가 미흡하다.

본 연구에서는 TaN 박막의 식각 특성을 알아보기 위하여, CF<sub>4</sub>와 Ar의 혼합 가스를 이용하여 TaN 박막의 식각 공정을 진행하였다. 또한 가스 혼합 비율,

a. Corresponding author; [cikim@cau.ac.kr](mailto:cikim@cau.ac.kr)

RF 전력, 직류 바이어스 전압, 그리고 공정 압력에 따른 식각 속도와 선택비를 측정하였다. 식각 후 표면 조성 및 화학적 결합 상태는 XPS (x-ray photoelectron spectroscopy) 분석을 통하여 알아보았다.

## 2. 실험 방법

본 실험에서 사용한 시료는 TaN/SiO<sub>2</sub>/Substrate 구조로 TaN 박막의 두께는 100 nm이다. TaN 박막과의 선택비를 알아보기 위하여 마스크로써 사용되는 SiO<sub>2</sub>와 photoresist (PR)을 사용하였다. TaN 박막의 식각 특성을 알아보기 위하여, 유도 결합 플라즈마 (inductively coupled plasma, ICP) 시스템을 사용하여 실험을 진행하였다.

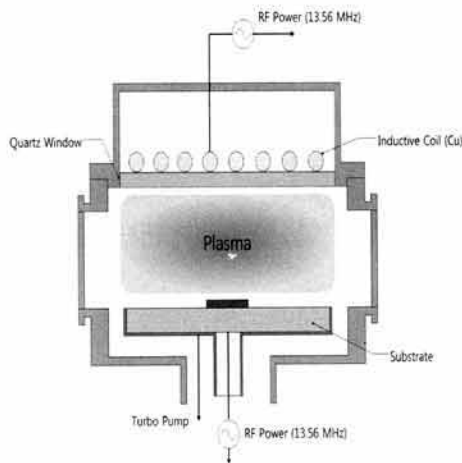


Fig. 1. The structure of inductively coupled plasma.

그림 1은 유도 결합 플라즈마 시스템을 나타낸 그림이다. 원형 반응로 (chamber)는 지름이 26 cm, 내부의 높이가 9 cm이다. 반응로 상부에는 플라즈마를 형성하기 위하여 구리 코일 안테나가 석영창에 의해 반응로 내부와 격리되어 연결되어 있으며, 안테나에 전원을 인가하기 위하여 13.56 MHz의 주파수를 가지는 RF전원이 연결되어 있다. 또한 하부에도 상부와 같은 13.56 MHz 주파수를 가지는 RF 전원이 연결되어 있으며, 이는 이온을 제어하기 위하여 DC generator와 연결되어 있다. 반응로 내부의 압력은 mechanical pump와 turbo molecular pump를 이용하여 10<sup>-6</sup> Torr까지 유지

하였고, throttle valve를 이용하여 실험 중 공정 압력을 일정하게 조절하였다.

본 실험에서는 TaN 박막의 식각 특성을 알아보기 위하여, 기본 공정 조건은 500 W의 RF 전력, -150 V의 직류 바이어스 전압, 그리고 2 Pa의 공정 압력을 유지하였다. 식각 공정은 각각의 공정 변수 (가스 혼합비, RF 전력, 직류 바이어스 전압, 공정 압력)의 변화에 따라 진행하였다. 식각 속도를 측정하기 위하여 식각 공정 후 각 박막의 두께를 surface profiler (α-step 500, KLA tencor)를 이용하여 측정하였다. 또한 표면의 화학적 구성 및 변화를 알아보기 위하여 x-ray photoelectron spectroscopy (PHI 5000 Versa Probe, VLVac-PHI)를 이용하여 분석을 진행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

그림 2는 CF<sub>4</sub>/Ar 가스 혼합비에 따른 TaN 박막의 식각 속도와 TaN 박막과 SiO<sub>2</sub>, PR의 선택비를 나타낸 것이다. 이때의 다른 공정 조건은 500 W의 RF 전력, -150 V의 직류 바이어스, 2 Pa의 공정 압력을 유지하였다.

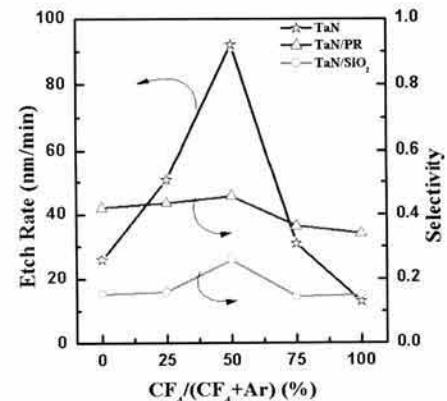


Fig. 2. The etch rate of the TaN thin films and selectivity of TaN to SiO<sub>2</sub> and PR as a function of the gas mixing ratio.

그림 2에서 CF<sub>4</sub> 가스의 비율을 0~50%까지 증가시켰을 때 식각 속도는 25.8 nm에서 92.05 nm까지 증가하였으며, 그 때의 TaN 박막과 SiO<sub>2</sub>, PR의 선택비는 각각 0.46, 0.26 이었다. 하지만 CF<sub>4</sub> 가스의 비율이

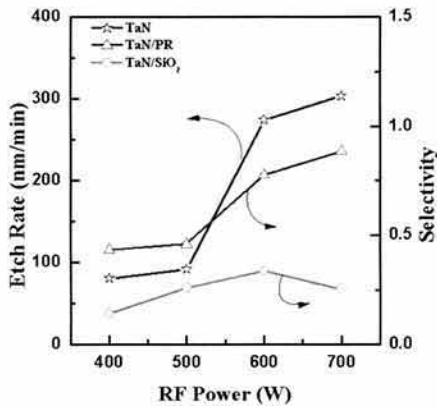


Fig. 3. The etch rate of the TaN thin films and selectivity of TaN to SiO<sub>2</sub> and PR as a function of the RF Power.

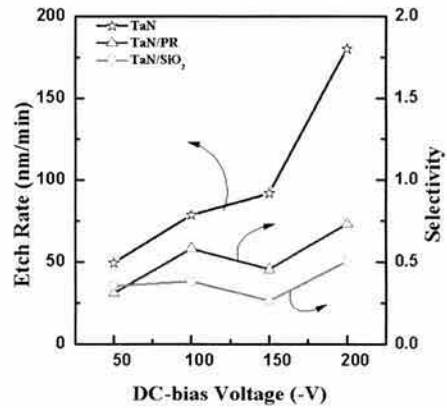


Fig. 4. The etch rate of the TaN thin films and selectivity of TaN to SiO<sub>2</sub> and PR as a function of the DC-bias voltage.

50% 이상이 되었을 경우 오히려 식각 속도는 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 플로린 계열의 가스를 이용한 식각 공정 시, TaN 박막 표면에서는 플라즈마와 반응하여 휘발성이 높은 Ta-F, N-F와 같은 식각 부산물들이 형성이 되어 식각에 기여하였으며, Ta-C와 같은 비휘발성 식각 부산물들은 Ar 이온에 의한 물리적인 스퍼터링 효과에 의하여 표면에서 탈착이 되는 것으로 사료된다. 하지만, CF<sub>4</sub> 가스의 비율이 50% 이상이 될 경우 Ar 가스의 비율이 줄어들어 상대적으로 CF<sub>4</sub> 해리의 도움을 주지 못하고, TaN 박막과 반응하여 표면에서 생성된 비휘발성 식각 부산물들을 효과적으로 제거하지 못하기 때문에 식각 속도가 감소하는 것으로 사료된다 [5].

그림 3은 CF<sub>4</sub>/Ar=(50%:50%) 플라즈마에 -150 V의 직류 바이어스, 2 Pa의 공정 조건에서 RF 전력의 변화에 따른 TaN 박막의 식각 속도와 TaN 박막과 SiO<sub>2</sub>, PR의 선택비를 나타낸 것이다. RF 전력은 400 W에서 700 W까지 변화시켰다. RF 전력이 증가할수록 식각 속도도 증가하는 것으로 나타났다. 700 W일 때 식각 속도는 304 nm였으며, 그 때의 TaN과 SiO<sub>2</sub>, PR 과의 선택비는 각각 0.88, 0.34였다. 이는 RF 전력이 증가할수록 반응실 안의 진동하는 전자들이 많아지고, 이온화될 확률도 같이 증가하게 된다. 그러므로 RF 전력이 증가할수록 C와 F 라디칼의 밀도가 증가하여 TaN 박막 표면에서의 화학적 반응이 일어날 확률이 많아지고, 이로 인하여 식각 속도가 증가한

것으로 사료된다.

그림 4는 직류 바이어스 전압에 따른 식각 속도 변화를 나타낸 것이다. 이때의 공정 조건은 CF<sub>4</sub>/Ar=(50%:50) 플라즈마에 500 W의 RF 전력, 2 Pa의 공정 조건에서 진행하였다. 직류 바이어스 전압이 증가할수록 식각 속도도 증가하는 것을 알 수 있었다. 직류 바이어스 전압이 -50 V에서 -200 V로 증가할 때 식각 속도는 49.58 nm에서 180.45 nm로 증가하였다. 이는 직류 바이어스 전압이 증가할수록 Ar 이온들이 TaN 박막으로 향하는 물리적인 에너지를 증가시키기 때문에, 표면에 잔류하고 있는 비휘발성 식각 부산물들을 더욱 효과적으로 제거하여 식각 속도가 향상되었다고 사료된다 [6].

그림 5는 CF<sub>4</sub>/Ar=(50%:50%) 플라즈마에 500 W의 RF 전압, -150 V의 직류 바이어스의 공정 조건에서 공정 압력의 변화에 따른 TaN 박막의 식각 속도와 TaN 박막과 SiO<sub>2</sub>, PR의 선택비를 나타낸 것이다. 압력이 증가할수록 식각 속도는 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 가장 높은 식각 속도는 1 Pa에서 263.56 nm였다. 식각 중에 압력은 이온 에너지와 식각 방향에 대하여 영향을 미친다. 공정 압력이 낮을 경우 평균 자유행정이 길어져 TaN 박막 표면 도달하는 이온의 에너지 손실이 적다. 그래서 물리적인 스퍼터링에 의한 효과가 크며, 표면에서 화학적 반응이 일어난 후 반응 가스 및 식각 부산물들이 잘 배출되어 식각 속도가 증가하는 것으로 사료된다. 하지만 공정 압력

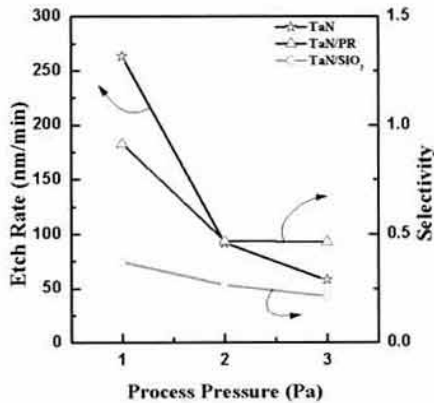


Fig. 5. The etch rate of the TaN thin films and selectivity of TaN to SiO<sub>2</sub> and PR as a function of the process pressure.

이 높을 경우, 내부에 잔류하는 입자들의 양이 많아지기 때문에, 평균 자유행정이 짧아지고, 결국 입자가 가지고 있는 운동에너지를 감소시켜 박막 표면에서의 물리적 스퍼터링 효과를 감소시키게 된다 [7,8].

다음은 TaN 박막 표면에서의 화학적인 반응에 따른 식각 특성을 알아보기 위해서 XPS narrow scan spectra 분석을 진행하였다. TaN 박막 표면에서의 화학적인 반응을 알아보기 위하여 식각 전과 식각 후의 TaN 박막의 표면을 분석하여 비교했다. 식각 시 공정 조건은 500 W의 RF 전압, -150 V의 직류 바이어스 전압, 그리고 2 Pa의 공정 압력을 유지하였다.

그림 6은 CF<sub>4</sub>/Ar의 혼합 가스비를 변화했을 때, Ta 4f narrow scan spectra 분석 결과이다. 그림 6(a)는 식각 공정을 진행하기 전, 그림 6(b)는 CF<sub>4</sub>/Ar = (50%:50%) 플라즈마에서 식각 공정을 진행한 후, 마지막으로 그림 6(c)는 순수 CF<sub>4</sub> 플라즈마에서 식각 공정을 진행한 후의 XPS narrow scan spectra이다.

식각 공정을 진행하기 전과 식각 공정을 진행한 후의 스펙트럼을 비교해 보면 각각의 peak들의 intensity 및 결합 에너지가 변화하는 모습을 관찰할 수 있다. 이는 CF<sub>4</sub>/Ar 플라즈마의 식각 공정으로 인하여 표면에서 화학적 결합이 발생했다고 사료된다. 그림 6(b)의 경우 표면에서의 화학적 반응 뿐만 아니라 Ar이온의 스퍼터링 효과로 인하여 그림 6(c)일 경우 보다 표면에서의 화학적인 반응이 많이 일어났음을 알 수 있다. 또한 표면에서의 화학적 반응 및 물리적인 스

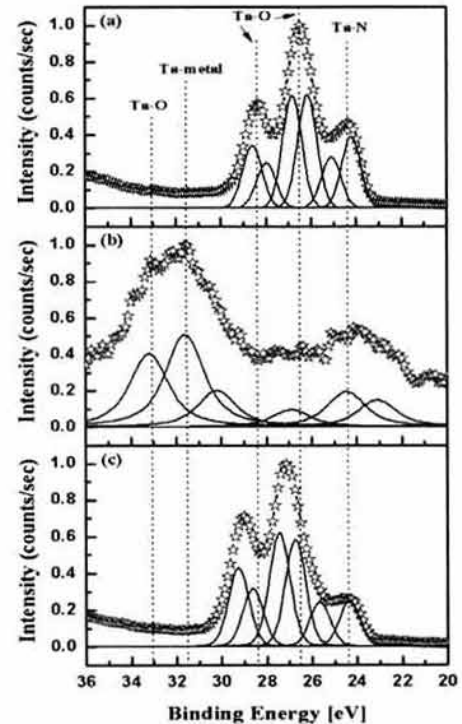


Fig. 6. Ta 4f XPS narrow scan spectra of the surface of the TaN thin films under CF<sub>4</sub>/Ar gas mixing ratio. (a) as-deposited, (b) CF<sub>4</sub>/Ar = (50%:50%), (c) pure CF<sub>4</sub>.

퍼터링으로 인하여 상대적으로 휘발성의 높은 N과의 결합이 형성되어 식각 속도에 기여하였음을 알 수 있다. 이로 인하여 Ta-N의 결합이 깨지고 표면에는 Ta-O, Ta metal peak이 관찰되는 것을 알 수 있다 [9]. CF<sub>4</sub> 가스만 주입하였을 경우에도 TaN 박막 표면에서의 화학적인 변화가 일어나지만, Ar gas와 같이 주입하였을 경우보다는 적은 양의 변화가 생긴다는 것을 알 수 있다. 이는 물리적인 스퍼터링 작용에 의하여 TaN 표면에서 CF<sub>4</sub>가스와 반응을 할 수 있는 확률이 높아지고, 이는 더 많은 화학반응을 촉진시키는 것으로 생각된다. 또한 CF<sub>4</sub> 가스와의 반응으로 인하여 TaN 박막 표면에는 Ta<sub>x</sub>-F<sub>y</sub> 형태의 식각 부산물들이 잔류할 것으로 판단된다.

그림 7은 CF<sub>4</sub>/Ar 혼합 가스비를 변화 했을 때, N 1s narrow scan spectra 분석 결과이다. 그림 7(a)는 식각 공정을 진행하기 전, 그림 7(b)는 CF<sub>4</sub>/Ar = (50%:50%) 플라즈마에서 식각 공정을 진행한 후, 마지막으로 그림 7(c)는 순수 CF<sub>4</sub> 플라즈마에서 식각 공정을 진행한 후의 XPS narrow scan spectra이다. 식각 공정을 진행하

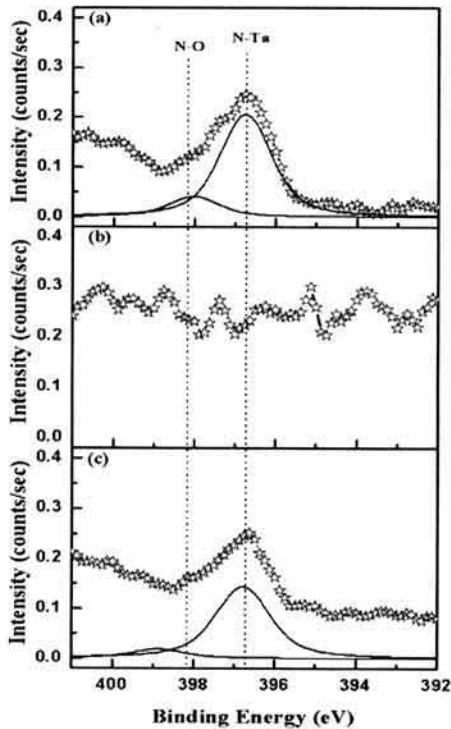


Fig. 7. N 1s XPS narrow scan spectra of the surface of the TaN thin films under  $\text{CF}_4/\text{Ar}$  gas mixing ratio. (a) as-deposited, (b)  $\text{CF}_4/\text{Ar} = (50\%:50\%)$ , (c) pure  $\text{CF}_4$ .

기 전과 식각 공정을 진행한 후의 스펙트럼을 비교해 보면 각각 peak의 intensity 및 결합에너지가 변화하는 모습을 볼 수 있다. 그림 7(b)의 경우  $\text{CF}_4/\text{Ar}$  플라즈마 식각 후 표면에 N 원소가 남아 있을 확률이 거의 없음을 알 수 있다. 이는 N 원소가  $\text{CF}_4$  가스와 반응하여 식각이 되었다는 것을 의미한다. N-C, N-F 등의 식각 부산물들은 휘발성이 강하기 때문에 표면에 남아있지 않고 바로 탈착되어 가스 형태로 배출되게 된다. 하지만 그림 7(c)에서 보듯이,  $\text{CF}_4$  가스만 첨가하였을 경우 플라즈마 식각 공정을 진행하기 전과 많은 차이를 보이지 않는다. 이는 Ar 이온의 물리적 스퍼터링 효과가 Ta-N의 강한 결합을 깨뜨려  $\text{CF}_4$ 와 반응할 확률을 높여주기 때문에  $\text{CF}_4$  가스만 첨가하였을 경우 표면에서의 화학적 반응이 현저히 줄어들었을 것이라고 사료된다.

#### 4. 결론

본 실험에서는  $\text{CF}_4/\text{Ar}$  플라즈마에서의 TaN 박막의 공정 조건에 따른 식각 속도 변화와 박막 표면의 화학적 변화를 연구하였다. 식각 프로파일을 구현하기 위해서 가스 혼합 비율, RF 전력, 직류 바이어스 전압, 공정 압력 등의 공정 변수를 변화시켜 실험을 진행하였다. 이번 실험에서  $\text{CF}_4/\text{Ar} = (50\%:50\%)$  플라즈마에서 식각 속도가 높았으며, RF 전력과 직류 바이어스 전압이 높아질수록 식각 속도는 증가하였다. 하지만 공정 압력이 증가할수록 식각 속도는 감소하는 경향을 보였다. XPS 분석을 통하여 식각 공정 시 TaN 박막 표면에서 일어나는 화학적인 변화를 알 수 있었다. 식각 공정 시  $\text{CF}_4$  가스와 반응으로 인하여  $\text{Ta}_x\text{-F}_y$ 와 같은 식각 부산물을 생성시키며, 이 식각 부산물들은 휘발성이 낮기 때문에 물리적 스퍼터링 효과에 의해서 제거가 가능하다고 판단된다.

#### REFERENCES

- [1] M. H. Shin, S. W. Na, N. E. Lee, T. K. Oh, J. Y. Kim, T. H. Lee, and J. H. Ahn, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**, 5811 (2005).
- [2] J. A. Wilks, N. P. Magtoto, J. A. Kelber, and V. Arunachalam, *Appl. Sur. Sci.*, **253**, 6176 (2007).
- [3] A. Vandooren, A. Barr, L. Mathew, T. R. White, S. Egley, D. Pham, M. Zavala, S. Samavedam, J. Schaeffer, J. Conner, B. Y. Nguyen, and B. E. White, *IEEE Elec. Dev. Lett.*, **24**, 342 (2003).
- [4] H. Shimada and K. Maruyama, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **43**, 1768 (2004).
- [5] A. M. Efremov, D. P. Kim, and C. I. Kim, *Vacuum*, **75**, 133 (2004).
- [6] F. A. Khan, L. Zhou, V. Kumar, I. Adesida, and R. Okajie, *Mat. Sci. Eng., B118*, 201 (2005).
- [7] S. M. Koo, D. P. Kim, K. T. Kim, and C. I. Kim, *Mat. Sci. Eng., B118*, 201 (2005).
- [8] F. A. Khan and I. Adesida, *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 2268 (1999).
- [9] P. Lamour, P. fioux, A. Ponche, M. Nardin, M. F. Vallat, P. Dugay, J. P. Brun, N. Moreaud, and J. M. Pivodic, *Surf. Interface Anal.*, **40**, 1430 (2008).