# 플라즈마 강화 원자층 증착법에 의한 $TaN_x$ 박막의 전기 전도도 조절

류성연·최병준<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 신소재공학과

# Electrical Conductivity Modulation in TaN<sub>x</sub> Films Grown by Plasma Enhanced Atomic Layer Deposition

Sung Yeon Ryu and Byung Joon Choi<sup>†</sup>

Department of Materials Science and Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea

(Received March 23, 2018: Revised March 28, 2018: Accepted March 30, 2018)

Abstract  $TaN_x$  film is grown by plasma enhanced atomic layer deposition (PEALD) using t-butylimido tris(dimethylamido) tantalum as a metalorganic source with various reactive gas species, such as  $N_2+H_2$  mixed gas,  $NH_3$ , and  $H_2$ . Although the pulse sequence and duration are the same, aspects of the film growth rate, microstructure, crystallinity, and electrical resistivity are quite different according to the reactive gas. Crystallized and relatively conductive film with a higher growth rate is acquired using  $NH_3$  as a reactive gas while amorphous and resistive film with a lower growth rate is achieved using  $N_2+H_2$  mixed gas. To examine the relationship between the chemical properties and resistivity of the film, X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) is conducted on the ALD-grown  $TaN_x$  film with  $N_2+H_2$  mixed gas,  $NH_3$ , and  $H_2$ . For a comparison, reactive sputter-grown  $TaN_x$  film with  $N_2$  is also studied. The results reveal that ALD-grown  $TaN_x$  films with  $NH_3$  and  $H_2$  include a metallic Ta-N bond, which results in the film's higher conductivity. Meanwhile, ALD-grown  $TaN_x$  film with a  $N_2+H_2$  mixed gas or sputtergrown  $TaN_x$  film with  $N_2$  gas mainly contains a semiconducting  $Ta_3N_5$  bond. Such a different portion of Ta-N and  $Ta_3N_5$  bond determins the resistivity of the film. Reaction mechanisms are considered by means of the chemistry of the Ta precursor and reactive gas species.

Key words TaN<sub>x</sub> film, plasma enhanced atomic layer deposition, reactive gas, electrical conductivity, chemical bonding.

#### 1. 서 론

 $TaN_x$  박막은 우수한 기계적 내구성, 내화학성과 열적 안정성 등 다양한 특성으로 인해 집적 미세 전자 소자에서 박막 저항체(thin film resistor), 구리 전극의 확산 방지막(diffusion barrier), NAND Flash메모리의 전극층, 자성 메모리(magnetic random access memory)의 비자성층간막(non-magnetic interlayer) 등에서 널리 쓰이고 있다.  $^{1-5}$ ) 뿐만 아니라,  $Ta(O)N_x$ 나  $Ta_3N_5$ 의 경우 밴드 갭에너지가  $2.1\sim2.3~eV$ 로 태양광 에너지 흡수에 적합하기때문에 태양광 물 분해(solar water splitting)를 위한 광

촉매제(photocatalyst)로도 주목 받고 있다.6

TaN<sub>x</sub> 박막의 증착은 반응성 스퍼터링(reactive sputtering) 이나 화학 기상 증착(CVD; chemical vapor deposition), 또는 원자층 증착법(ALD; atomic layer deposition) 등으로 이루어진다. 일반적으로는 반응 가스에서 질소 분압이 증가할수록 박막 내 질소의 조성이 증가하게 되어, 증착되는 박막의 저항이 증가하는 것으로 알려져 있다. <sup>7,8)</sup> 원자층 증착법에서는 다양한 Ta 전구체가 사용되었다. 초기에는 TaF<sub>5</sub>, TaCl<sub>5</sub>, TaBr<sub>5</sub> 등 할라이드(halide) 계열의 전구체가 사용되었으나, ALD 반응 단계에서 발생하는

HF, HCl, HBr 등의 부산물 가스가 부식성이 있고. 박

†Corresponding author

E-Mail: bjchoi@seoultech.ac.kr (B. J. Choi, Seoultech.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creative-commons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

막 내 불순물로 잔존하는 문제가 있으며, 이러한 불순물을 없애기 위해서 요구 되는 증착 온도가 400 ℃ 이상으로 비교적 높은 것으로 알려져 있다. <sup>9-11)</sup> 이에 비해 아마이드(amide) 계열의 Ta 전구체는 암모니아와 같은 반응 가스와 리간드 교환 반응을 일으키는 데 필요한 반응 에너지가 10.6, 27.6 kcal/mol로 낮기 때문에 비교적 낮은 증착 온도(<300 ℃)에서 ALD 공정을 할 수 있다는 장점이 있다. 아마이드 계열의 Ta 전구체로는 pentakis (dimethylamino) tantalum(PDMAT), pentakis(ethylmethylamino) tantalum(PEMAT), (tertbutylimido) tris(diehylamido) tantalum(TBTDET) 등이 보고 된 바 있다. <sup>11-13)</sup>

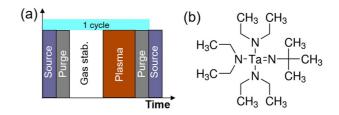
한편 원자층 증착법으로 증착한  $TaN_x$  박막은 Ta 전 구체가 대부분 Ta(V) 또는 Ta(IV)의 산화 상태를 갖고 있고, 반응 가스로 사용 되는 암모니아( $NH_3$ ) 또는 질소/수소 라디칼 가스, 하이드라진( $hydrazine, N_2H_4$ ) 가스에 의해 질소 성분이 충분히 공급되기 때문에 Ta(III)를 갖는 금속성의  $TaN_9$  형성하기가 어려우며, 대부분은 저항이 높은 반도체성 또는 절연성  $TaN_x$  박막이 주로 형성되는 것으로 보고되고 있다. 9.11-14 따라서 공정 변수를 통해 전기 전도성을 조절할 수 있는  $TaN_x$  박막을 얻는 것이 ALD 방법에서는 중요한 이슈이다.

본 연구에서는 플라즈마 강화 원자층 증착법(PEALD; plasma enhanced atomic layer deposition)을 이용해 증착한 TaN<sub>x</sub> 박막에서 반응 가스의 종류를 변화 시킴에 따라 전기 전도성의 변화와 박막 내 Ta-N의 화학적 결합 상태의 연관성을 분석했다. 이를 통해 ALD 반응에서 반응 가스에 따른 반응 메커니즘의 변화를 이해하고자 했다.

## 2. 실험 방법

PEALD를 이용해 350 °C 기판 온도에서  $TaN_x$  박막을 증착 했다. Fig. 1(a)에는 PEALD에서 사용된 펄스 순서를 나타냈다. 소스 주입 $(2^{\frac{1}{2}})$  - 퍼지 $(3^{\frac{1}{2}})$  - 반응가스 안정화 $(3^{\frac{1}{2}})$  - 플라즈마 활성화 $(5^{\frac{1}{2}})$  - 퍼지 $(3^{\frac{1}{2}})$ 의 순서로 1 ALD 사이클이 이루어졌다. PEALD에 사용 된 1 전구체로는 Fig. 1(b)와 같이 1 TBTMET[t-butylimido tris (dimethylamido) tantalum, SAFC Hitech]가 사용되었다. 그리고 플라즈마 반응 가스로는 1 N₂+H₂(1 N₂ 40 SCCM + H₂ 1 SCCM) 혼합 가스, 1 NH₃(1 SCCM), H₂(1 SCCM) 1 각각 사용 되었다. 세부적인 증착 조건은 이전에 출판 된 논문에서 확인할 수 있다.

 $TaN_x$  박막의 증착 속도는 실리콘 기판에서 증착한  $TaN_x$  박막의 두께를 3차원 프로파일러를 이용해 측정하여 ALD 증착 사이클 당 두께를 계산하여 얻었다. 박막의 미세 구조와 결정성은 그리드 위에 성장 시킨  $TaN_x$  박막을 투과전자현미경(TEM; transmission electron micro-



**Fig. 1.** (a) Pulse sequence of ALD process, (b) Molecular structure of TBTMET.

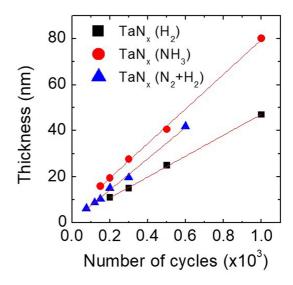


Fig. 2. Thickness of ALD  $TaN_x$  films as a function of number of cycles with various reactive gases.

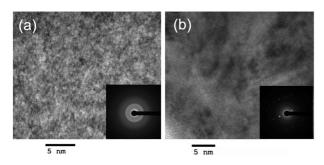
scopy)을 이용해 분석했다. 박막의 표면 형상은 원자힘 현미경(AFM; atomic force microscopy)을 이용해 표면 거칠기(surface roughness)를 구하여 비교했다.

 $TaN_x$  박막의 전기 전도도는 4-point probe와 반도체 파라미터 분석 장비(SPA; semiconductor parameter analyzer, HP-4156)를 이용해 상온에서 I(전류) - V(전압) 특성을 측정하여 얻었다.

박막 내 원자 간 결합 상태를 알아 보기 위해 X-선 분광계(XPS; X-ray photoelectron spectroscopy)가 사용되었다. 이 때 Al  $k\alpha$ 선이  $TaN_x$  샘플 표면에 입사되었고, 탄소 1s 특성선의 검출 에너지를 이용해 보정 되었다.

#### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2에는 반응 가스 종류별 PEALD 증착 사이클 수에 따른  $TaN_x$  박막의 두께를 나타냈다. 이 그래프에서 기울기를 이용해 증착 속도(nm/cycle)를 얻을 수 있었다. 암모니아, 수소, 질소+수소 혼합가스를 각각 플라즈마 반응 가스로 사용했을 때,  $TaN_x$  박막의 증착 속도는 각각



**Fig. 3.** plan-view TEM images of ALD-grown  $TaN_x$  films with (a)  $N_2+H_2$  and (b)  $NH_3$  as reactive gas.

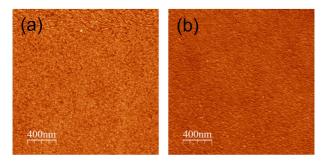


Fig. 4. AFM images of ALD-grown  $TaN_x$  films with (a)  $N_2+H_2$  and (b)  $NH_3$  as reactive gas.

0.075, 0.045, 0.068 nm/cycle로 차이 나게 얻어 졌다. 소스 주입 시간과 반응 가스의 주입 시간, 플라즈마 반응시간은 동일하였기 때문에, 반응 가스의 종류와 유입량에 따른 표면 ALD 반응의 속도 차이가 발생한 것으로생각 된다. 반응 가스에 따른 ALD 반응 메커니즘의 차이에 대해서는 후반부에 다시 논의 하겠다.

Fig. 3에는 반응 가스의 종류에 따른  $TaN_x$  박막의 TEM 평면 사진을 나타냈다. Fig. 3(a)와 같이 암모니아 가스를 사용한  $TaN_x$  박막에서는 결정상이 확인 되었다. 반면에 질소+수소 혼합가스를 사용한  $TaN_x$  박막에서는 결정상이 거의 나타나지 않았다. 이러한 반응 가스에 따른 결정성의 차이는 X-선 회절 분석에서도 확인된 바 있는데, 암모니아 반응 가스를 사용한  $TaN_x$  박막에서는 FCC (111)의 우선 배향성을 갖는 것으로 나타났다. [5]

Fig. 4에는 AFM 표면 분석을 통해 얻은 TaN<sub>x</sub> 박막의 표면 형상을 나타냈다. 암모니아 가스와 질소+수소 혼합 가스를 사용한 TaN<sub>x</sub> 박막의 거칠기(root mean square roughness)는 각각 1.14, 1.02 nm로 나타났다. 이를 통해 평탄도가 높은 균질한 특성의 박막이 형성되었음을 알수 있다. 암모니아 가스를 사용한 박막에서 거칠기 정도가 약간 더 높았는데, 이것은 앞서 언급한 결정화에 따른 비등방성 입도 성장으로 인한 것으로 생각 된다.

Fig. 5는 4-point probe와 SPA를 이용해 얻은 TaN<sub>x</sub> 박

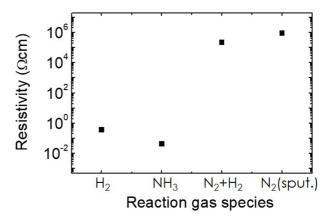
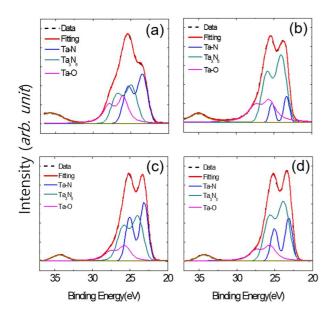


Fig. 5. Electrical resistivity of  $TaN_x$  films with various reactive gas species.

막의 비저항을 나타냈다. 비교를 위해서 반응성(reactive) 스퍼터링을 이용해 질소 분위기에서 증착한 TaN, 박막 의 비저항을 같이 나타냈다. 암모니아와 수소 분위기에서 ALD를 이용해 증착한 TaN<sub>x</sub> 박막에서는 4-point probe를 이용한 면저항 측정 결과를 이용해 비저항을 구했을 때, 각각 0.043(암모니아), 0.38(수소) Ωcm의 비교적 낮은 비 저항을 나타냈다. 이는 문헌에 보고 된 금속성 TaN 박 막의 비저항값인 0.25 mΩcm (at 300K)에 비해서는 약 170, 1500배로 크게 높은 수준이다.<sup>11)</sup> 반면에 질소+수소 혼합가스를 사용한 TaNx 박막은 4-point probe의 측정 범위를 벗어나는 높은 면저항을 가져서 SPA를 이용해 Pt/TaN<sub>x</sub>/Pt 적층 구조에서 측정한 결과,  $2.3 \times 10^5 \Omega cm$ 의 절연성이 높은 비저항을 보였다. 15) 이는 질소 분위기에 서 스퍼터링 방법으로 증착한 TaN<sub>x</sub> 박막의 비저항인 9.0  $imes 10^5 \Omega cm$ 의 비저항에 근접한 값에 해당한다. 이를 통해 암모니아나 수소 분위기에서 ALD 증착한 경우 비저항 이 낮은 TaN, 박막이 얻어 지고, 높은 질소 함량 분위 기에서 ALD 증착한 경우에는 비저항이 높은 TaN<sub>x</sub> 박 막이 상반되게 얻어지는 것을 알 수 있었다.

반응 가스의 종류에 따라 TaN<sub>x</sub> 박막의 전기적인 특성이 크게 차이가 나는 보다 명확한 원인을 알아 보기 위해, XPS 분석을 통해 박막 내 Ta-N 결합의 특성과 불순물 함량을 분석했다. 여기서 분석에 사용한 TaN<sub>x</sub> 박막은 모두 네 종류로, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>를 각각 반응 가스로 써서 ALD를 이용해 증착한 세 종류의 TaN<sub>x</sub> 박막과, 질소를 반응 가스로 써서 스퍼터를 이용해 증착한 TaN<sub>x</sub> 박막을 포함한다. Fig. 6(a-d)에는 Ta 4f의 결합 에너지 영역에서 얻은 각 박막의 에너지 스펙트럼을 나타냈다. 반응 가스에 따라 Ta 원자의 결합 상태가 다르게나타난 것을 볼 수 있다. 여기서는 가능한 결합 상태로 Ta-N 금속성 결합, Ta<sub>3</sub>N<sub>5</sub> 공유결합, 그리고 Ta-O 이온 결합의 세 종류 결합을 가정하여 에너지 픽 분리(peak



**Fig. 6.** XPS spectra of Ta 4f from ALD-grown  $TaN_x$  films with reactive gas of (a)  $H_2$ , (b)  $N_2+H_2$ , (c)  $NH_3$ , and (d) sputter-grown  $TaN_x$  film with  $N_2$ .

**Table 1.** Composition of TaN films estimated from XPS spectra of Ta 4f from ALD-grown  $TaN_x$  films with reactive gas of  $H_2$ ,  $NH_3$ ,  $N_2+H_2$ , and sputter-grown  $TaN_x$  film with  $N_2$ .

	$H_2$	$NH_3$	N <sub>2</sub> +H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> , Sputtering
Ta-N	41.0 %	43.9 %	20.3 %	29.5 %
$Ta_3N_5\\$	35.3 %	35.6 %	58.0 %	54.1 %
Та-О	23.7 %	20.5 %	21.7 %	16.4 %

deconvolution)를 수행하였다. 먼저 전기 전도성이 높게 나오는 H<sub>2</sub>(Fig. 6a), NH<sub>3</sub>(Fig. 6c)를 반응 가스로 사용한 ALD TaN, 박막의 경우에는 다소 스펙트럼의 형태에 차 이가 있었으나, 대체로 Ta-N 결합에 해당하는 23.2 eV 의 결합 에너지가 주요 에너지로 높게 나타나는 것을 확 인할 수 있다. 반면, 전기 전도성이 낮은 N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub> 혼합 가 스를 사용한 ALD TaN, 박막(Fig. 6b)이나, N<sub>2</sub>를 반응 가스로 사용한 스퍼터링으로 형성한 TaN<sub>x</sub>(Fig. 6c) 박막 에서는 Ta<sub>2</sub>N<sub>5</sub> 결합에 해당하는 24.1 eV의 결합 에너지 가 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 한편 스펙트럼의 형 태가 약간 다른 H<sub>2</sub>(Fig. 6a) 반응 가스를 사용한 박막의 경우에는 Ta-O 결합에 해당하는 25.7 eV의 결합 에너지 가 상대적으로 높게 나타난 것으로 보아 ALD 박막 형 성 전/후에 산소 침입이 발생한 것으로 생각 된다. Table 1에는 XPS 스펙트럼을 통해 얻은 에너지 픽 면적을 이 용해 정량 분석을 한 결과를 나타냈다. 전도성이 높은 TaNx 막에서는 금속성의 Ta-N 결합이 정량적으로 가장 많았으며, 전도성이 낮은 TaN, 막에서는 반도체성을 갖 는 Ta<sub>3</sub>N<sub>5</sub> 결합이 우세했다. 모든 박막에서 절연성을 갖

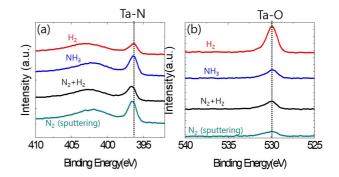


Fig. 7. XPS spectra of (a) N 1s and (b) O 1s from ALD-grown  $TaN_x$  films with reactive gas of  $H_2$ ,  $NH_3$ ,  $N_2+H_2$ , and sputter-grown  $TaN_x$  film with  $N_2$ .

는 Ta-O 결합이 많이 검출되는 것을 볼 수 있었으나 전도성에는 크게 영향을 미치지는 않는 것으로 나타났다. 이러한 산소는 주로 질소 자리에 침입한 산소 치환 결함  $(O_N)$ 들로 전자 전도 과정에서 트랩 자리로 작용할 수 있다는 것이 알려져 있다. $^{16}$ 

Fig. 7에는 반응 가스에 따라 형성된 TaN<sub>x</sub> 박막의 N 1s, O 1s 에너지 영역의 XPS 스펙트럼을 각각 나타냈다. Fig. 7(a)와 같이 N 1s의 경우 Ta-N 금속성 결합을 표시했고, 전도성이 높은 ALD TaN<sub>x</sub> 박막에서 Ta-N 결합이 잘 나타나는 것을 볼 수 있다. 반면에 전도성이 낮은 TaN<sub>x</sub> 박막에서는 조금 더 높은 결합 에너지 영역으로 픽이 이동된 것으로 보아 Ta<sub>3</sub>N<sub>5</sub> 결합이 보다 강하게 형성된 것을 알 수 있다. 한편 불순물에 해당하는 O 1s에서는 Fig. 7(b)에 나타난 것과 같이, 수소를 사용한 ALD TaN<sub>x</sub> 박막에서 특히 강하게 나타나는 것을 볼 수 있고 이는 Fig. 6의 Ta 4f에서 확인한 것과 동일한 결과이다.

이상의 박막 분석 결과를 통해 반응 가스가 ALD 반응에 미치는 영향과 이에 따른 박막 특성을 고찰해 보았다. Somani 등은 NH<sub>3</sub> 반응 가스의 사용 여부에 따라 Ta 전구체인 TBTMET와 반응 가스의 ALD 반응 메커니즘이 나뉘어 진다는 반응 모델을 제시했다. <sup>[12]</sup> 그에 따르면, NH<sub>3</sub> 반응 가스를 사용하는 경우 리간드 교환에 의해 dimethylamine기 [NMe<sub>2</sub> or N(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub> group]가 NH<sub>3</sub>와 치환되어 TBTMET로부터 제거 되는 ALD 반응이 일어나게 된다. 반면에 NH<sub>3</sub> 반응 가스를 사용하지 않는 경우, β-수소 이동(β-hydrogen transfer)에 의해 TBTMET 분자 내에서 자체적으로 수소의 이동이 일어나 dimethylamine기가 떨어져 나가는 모델이 제시 되었다. 두 반응에서 필요한 에너지는 전자의 경우 10.6 kcal/mol, 후자의 경우 64.3 kcal/mol의 에너지 장벽으로, NH<sub>3</sub>에 의한리간드 교환 반응에서 훨씬 낮은 에너지가 필요하다.

본 연구에서 NH,를 반응 가스로 사용한 경우에는 ALD

반응에 해당하는 리간드 교환 반응이 낮은 활성화 에너 지를 갖고 쉽게 일어나 amine기가 효율적으로 제거 되 면서 NH, 반응 가스의 질소가 남아 Ta-N 결합을 띄는 것으로 보인다. 하지만 NH; 반응 가스와는 달리 질소의 분율이 지나치게 높은 N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>(40:1) 혼합 가스를 사용한 경우에는 NH, 분자가 없고 플라즈마에 의해 활성화 된 수소 라디칼 역시 부족하기 때문에 리간드 교환 반응이 일어나기 어렵고, 따라서  $\beta$ -수소 이동 반응이 더 우세할 것으로 생각 된다. 이 때 필요한 활성화 에너지가 높기 때문에 반응 속도가 느리고, 따라서 Ta-N 결합보다는 잔 존하는 amine기에 의한 Ta,N5 결합이 남아 있는 것으 로 보인다. 한편, 수소 가스만을 플라즈마 반응 가스로 사용한 경우에는 수소 라디칼이 많아  $\beta$ -수소 이동 반응 을 돕는 역할을 할 뿐만 아니라 전구체에서 dimethylamine기가 떨어져 나간 자리에서 수소 라디칼에 의해 NH;를 반응 가스로 사용한 리간드 교환 반응과 유사한 형태의 표면 리간드가 형성되는 것으로 보인다. 하지만 이 반응은  $\beta$ 수소 이동과 리간드 교환 반응이 연쇄적으 로 일어나야 하기 때문에 NH;나 혼합 가스를 사용하는 경우에 비해서는 반응 속도나 효율이 낮아 TaNx 박막의 증착 속도가 낮고, 비저항 역시 약간 큰 것으로 생각 된 다(Fig. 2). 따라서 TBTMET와 NH, 반응 가스의 리간 드 교환에 의한 Ta-N 결합은 금속성을 나타내지만, 반 응 가스 내 질소 함량이 높은 경우에는 TBTMET의  $\beta$ -수소 이동 반응이 우세하게 되어 TBTMET 전구체 내 amine기가 효율적으로 치환되지 않고 박막 내 Ta-N 결 합이 다수 남아 Ta:N:의 공유 결합을 나타내고. 이는 TaN, 박막의 낮은 전도성의 결과로 나타난 것으로 생각 된다.

### 4. 결 론

TBTMET를 Ta 전구체로 사용하고 NH<sub>3</sub> 또는 N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub> (N<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>= 40:1 SCCM)를 반응 가스로 사용하는 PEALD를 통해 TaN<sub>x</sub> 박막의 증착 속도와 함께 박막의 결정성과 전기 전도성을 크게 변화 시킬 수 있었다. NH<sub>3</sub>를 반응 가스로 사용한 TaN<sub>x</sub> 박막은 FCC 구조의 결정상을가졌으며, 0.043 Ωcm의 비저항을 가져 비교적 높은 전도성을 갖는 것으로 나타났다. 반면에 N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub> 혼합 가스를 반응 가스로 사용한 TaN<sub>x</sub> 박막은 비정질 상태로 확인되었고,  $2.3 \times 10^5 \Omega$ cm의 높은 비저항을 가진 것으로나타났다. 결정성의 차이 뿐만 아니라, 화학 결합의 특성 역시 전기 전도성에 큰 영향을 준 것으로 나타났다. NH<sub>3</sub> 또는 H<sub>2</sub>를 반응 가스로 사용한 전도성이 높은 TaN<sub>x</sub> 박막은 금속성을 갖는 Ta-N 결합이 우세했으나, N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub> 혼합 가스를 사용한 ALD TaN<sub>x</sub> 박막이나 질소 분위기

에서 스퍼터링 방법으로 증착한  $TaN_x$  박막에서는 공유 결합성을 갖는  $Ta_3N_5$  결합이 더 우세한 것으로 XPS 정량 분석 결과 나타났다. 이러한 결합성의 차이가 나타난 것으로는 TBTMET 전구체와  $NH_3$  반응 가스의 리간드 교환 반응에 의해 Ta 전구체 내 amine기를 효율적으로 치환하여 금속성의 Ta-N 결합을 형성하기 때문인 것으로 예상 된다.

원자층 증착법에 의해 형성되는  $TaN_x$  박막은 통상 비저항이 높은 것으로 알려져 있으나, 이와 같이 반응 가스의 종류 및 유량 조절을 통해 박막의 비저항과 화학적 결합 상태를 조절함으로써  $TaN_x$  박막을 전자 소자나에너지 촉매 분야 등으로 다양하게 활용할 수 있을 것으로 기대 된다.

## Acknowledgements

This study was financially supported by Seoul National University of Science and Technology.

#### References

- C. L. Au, W. A. Anderson, D. A. Schmitz, J. C. Flassayer, and F. M. Collins, J. Mater. Res., 5, 1224 (1990).
- 2. T. Oku, E. Kawakami, M. Uekubo, K. Takahiro, S. Yamaguchi, and M. Murakami, Appl. Surf. Sci., **99**, 265 (1996).
- 3. T. Yeh, D. Swanson, L. Berg, and P. Karn, IEEE Trans. Magn., **33**, 3631 (1997).
- 4. S. I. Nakao, M. Numata, and T. Ohmi, Japanese J. Appl. Phys., **38**, 2401 (1999).
- 5. K. Kim and J. Choi, in IEEE Non-Volatile Semicond. Mem. Work. (2006), pp. 9-11.
- 6. P. Zhang, J. Zhang, and J. Gong, Chem. Soc. Rev., 43, 4395 (2014).
- 7. L. Yu, C. Stampfl, D. Marshall, T. Eshrich, V. Narayanan, J. M. Rowell, N. Newman, and A. J. Freeman, Phys. Rev. B, **65**, 245110 (2002).
- 8. S. M. Kang, S. G. Yoon, S. J. Suh, and D. H. Yoon, Thin Solid Films, **516**, 3568 (2008).
- 9. H. Kim, A. J. Kellock, and S. M. Rossnagel, J. Appl. Phys., **92**, 7080 (2002).
- 10. H.-S. Chung, J.-D. Kwon, and S. W. Kang, J. Electrochem. Soc., **153**, C751 (2006).
- 11. Z. Fang, H. C. Aspinall, R. Odedra, and R. J. Potter, J. Cryst. Growth, **331**, 33 (2011).
- 12. S. Somani, A. Mukhopadhyay, and C. Musgrave, J. Phys. Chem. C, **115**, 11507 (2011).
- 13. B. B. Burton, A. R. Lavoie, and S. M. George, J. Electrochem. Soc., **155**, D508 (2008).
- 14. M. Ritala, P. Kalsi, D. Riihela, and K. Kukli, Chem. Mater., 11, 1712 (1999).

246 류성연 · 최병준

- B. J. Choi, J. Zhang, K. Norris, G. Gibson, K. M. Kim, W. Jackson, M. X. M. Zhang, Z. Li, J. J. Yang, and R. S. Williams, Adv. Mater., 28, 356 (2016).
- C. M. Fang, E. Orhan, G. A. de Wijs, H. T. Hintzen, R. A. de Groot, R. Marchand, J.-Y. Saillard, and G. de With, J. Mater. Chem., 11, 1248 (2001).