

이차이온 질량분석기를 이용한 탄탈 박막내의 불순물 분석

임재원† · 배준우 · Minoru Isshiki

동북대학 다원물질과학연구소
(2003년 12월 16일 접수)

Impurity analysis of Ta films using secondary ion mass spectrometry

Jae-Won Lim†, Joon Woo Bae and Minoru Isshiki

Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, Sendai 980-8577, Japan
(Received December 16, 2003)

요 약

본 논문은 탄탈 박막의 증착시 음의 기판 바이어스에 의한 탄탈 박막내의 불순물 농도변화에 대해서 고찰하였다. 탄탈 박막은 실리콘 기판 위에 이온빔 증착장비를 이용하여 기판 바이어스를 걸지 않은 경우와 -125 V의 기판 바이어스를 걸 상태에서 증착하였다. 탄탈 박막내의 불순물 농도를 관찰하기 위해서 이차이온 질량분석기(secondary ion mass spectrometry)를 이용하였다. 세슘 클러스터 이온에 의한 깊이분석에서, -125 V의 기판 바이어스를 걸어줌으로써 산소, 탄소, 그리고 실리콘 불순물의 농도가 기판 바이어스를 걸지 않은 경우에 비해 상당히 감소한 것을 알 수 있었다. 또한, 세슘 이온빔과 산소 이온빔을 이용한 전체 불순물의 농도분포에서도, 음의 기판 바이어스가 박막 증착시 각각의 불순물 농도에 영향을 준다는 결과를 얻었고 이에 대한 고찰을 하였다.

주제어 : 이온빔 증착, 탄탈, 불순물, 기판 바이어스, 이차이온 질량분석

Abstract

Ta films were deposited on Si (100) substrates at zero substrate bias voltage and a substrate bias voltage of -125 V ($V_s = -125$ V) using a non-mass separated ion beam deposition system. To investigate the effect of the negative substrate bias voltage on the impurity concentration in the Ta films, secondary ion mass spectrometry (SIMS) was used to determine impurities in the Ta films. By the SIMS depth profiles with Cs^+ cluster ion beam, high intensities of O, C and Si were clearly found in the Ta film at $V_s = 0$ V, whereas these impurities remarkably decreased in the Ta film at $V_s = -125$ V. Furthermore, from the SIMS result with Cs^+ and O_2^+ ion beams, it was found that applying the negative substrate bias voltage could affect individual impurity contents in the Ta films during the deposition. Discussions concerning the effect of the negative substrate bias voltage on the impurity concentration of Ta films will be described in details.

Key words : ion beam deposition, tantalum, impurity, bias voltage, secondary ion mass spectrometry

1. 서 론

ULSI(ultra large-scale integration)의 초고집적화와 초고속화의 실현으로 박막 소자에 사용되는 알루미늄 또는 알루미늄 합금의 높은 비저항값으로 인한 Resistance-Capacitance(RC) time delay 문제 및 electromigration과 stressmigration 등이 소자의 신뢰도에 많은 문제점을 발생시키고 있다 [1,2]. 구리는 비저항값($1.67 \mu\Omega \text{cm}$)이 알루미늄 ($2.67 \mu\Omega \text{cm}$)에 비하여 상당히 낮고 electromigration에 대한 내성이 우수하여 차세대 반도체 배선 재료로서 실용화단계에 접어들고 있는 실정이지만, 아직도 성능향상을 위해 해결해야하는 몇 가지 문제점들을 갖고 있다. 그 중 하나는 구리가 실리콘이나 실리콘 산화막을 통해 확산하여 소자의 전기적 특성을 손상시키는 문제인데, 이를 방지하기 위하여 확산 방지막으로 주로 내화금속계 (Ti, TiN, Ta, TaN, W, WN) 재료들이 활발히 연구되어 구리 배선재료 공정에 사용될 수 있는 효과적인 특성을 갖추고 있는 것으로 알려져 있다 [3-5]. 그 중 탄탈은 고용점 내화 재료로써 다른 재료에 비해 낮은 저항값을 갖으며 구리와 탄탈의 반응이 없는 비교적 안정한 계면을 유지한다고 보고되고 있다 [6]. 또한, 탄탈 박막은 *b.c.c* α 와 *tetragonal* β 그리고 *f.c.c.* 탄탈상이 보고되어져 있지만, 박막으로 증착된 탄탈막은 주로 *b.c.c* α 또는 *tetragonal* β 상을 형성하는 것으로 알려져 있다 [7]. 그리고, β -탄탈상은 $110 \sim 300 \mu\Omega \text{cm}$ 의 높은 저항값을 가지지만 α -탄탈상은 $24 \sim 50 \mu\Omega \text{cm}$ 저항값으로 탄탈의 벌크 저항값($13 \mu\Omega \text{cm}$)에 가까운 값을 갖는다고 알려져 있으므로 [7], 낮은 저항값을 갖는 α -탄탈상의 확산 방지막으로 유용하게 쓰일 수 있다.

일반적으로 증착된 탄탈 박막은 주로 비저항값이 큰 β 상으로 이루어져 있는데 반해서, α 상의 탄탈 박막은 특정한 증착 조건이나 증착 기술에 의해서만 관찰되었다. 예를 들면, 티탄늄 기판 위의 증착 [3], 고온에서의 열처리 [8], 고온의 기판온도 [9], 또는 기판 바이어스에 의한 증착 [10] 등이 보고되어져 있다. 본 실험실의 이전 연구 [10] 에서, 비질량 분리형 이온빔 증착법으로 -125

V의 기판 바이어스를 걸어줌으로써 주로 α -탄탈 상으로 이루어진 탄탈 박막이 형성되었고, 이러한 탄탈막은 주상조직(columnar structure)을 갖지 않는 치밀한 구조로 약 $40 \mu\Omega \text{cm}$ 의 비저항값을 지니고 있었다. 반면에, 기판 바이어스를 걸지 않은 경우는 약 $250 \mu\Omega \text{cm}$ 의 높은 비저항값을 갖는 탄탈막이 형성되었다. 이러한 기판 바이어스에 의한 비저항값의 감소는 다음과 같은 3가지 이유로 설명되어질 수 있는데, 첫 번째는 박막밀도의 증가와 박막내의 결함감소를 들 수 있고, 두 번째로는 탄탈막내의 상변화(β 상에서 α 상으로)로 이전 논문에서 고찰되었다. 또한, 박막 증착시 기판 바이어스에 의한 박막내의 불순물 감소가 생각되어지는데 아직 이에 대한 검증이 이루어지지 않은 관계로 본 논문에서는 박막내의 불순물에 대한 기판 바이어스의 영향에 대해서 논하고자 한다.

이차이온 질량분석기(secondary ion mass spectrometry: SIMS)는 고 에너지(수 KeV ~ 20 KeV)의 일차이온을 시료표면에 주사함으로써 스퍼터링된 이차이온을 질량분석기에 의해 질량 대 전하의 비(m/e)에 따라 검출하는 장비로 표면에서부터 방출되는 모든 양이온과 음이온을 이용하여 미량원소의 정성·정량분석에 유용하게 쓰이고 있다. 본 실험에서는 탄탈 증착에 이용된 탄탈 타겟을 증착된 탄탈 박막과 함께 분석함으로써 박막 증착시의 불순물의 함유와 기판 바이어스에 의한 불순물 농도변화에 대해서 고찰하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 이용된 비질량 분리형 이온빔 증착장비의 개략도와 설명은 이미 다른 논문에서 보고되었다 [10]. 고진공($3 \times 10^{-5} \text{ Pa}$) 챔버 내에 고주파 스퍼터 타입 이온 소스가 있으며 이것은 플라즈마 여기용 고주파 구리 코일(5 turns, 57.5 mm inner diameter)과 그 중심부에 봉상형 탄탈 타겟(99.99 %)으로 구성되어 있다. 실리콘(100)기판은 아세톤으로 초음파 세척한 후, 5% 불산(HF)용액으로 표면 산화막을 제거하였다. 실리콘 기판과 타겟의 거리는 35 mm부터 150 mm까지 조절가능하나 증착 속도를 향상을 위해 가장 가까운 거리인

35 mm에서 10분간 박막을 증착하였다. 고순도 (99.9995%)의 아르곤 가스를 주입시켜 9 Pa을 유지시킨 후, 고주파 전원(260 W)에 의해 아르곤 플라즈마를 생성시킨다. 이때 탄탈 타겟에 직류 마이너스 전압(-500 V)을 걸어줌으로써 이온화된 아르곤에 의해 탄탈 타겟이 스퍼터링 되고 스퍼터링 현상에 의해 방출된 탄탈 중성원자와 탄탈 이온, 또는 아르곤입자들이 실리콘 기판에 증착되어진다. 또한 음의 기판 바이어스를 걸어줌으로써 탄탈 이온들의 증착이 가속화되어진다. 비저항측정은 Van der Pauw 방법 [11] 으로 인듐전극을 가지고 측정하였으며, 박막내의 불순물 농도를 알기 위해 Secondary ion mass spectrometry (ULVAC-PHI SIMS 6600)를 이용하였다. SIMS 분석시의 조건을 표 1에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 음의 기판 바이어스에 의한 증착된 탄탈막의 비저항값의 변화를 나타낸 것이다. 바이어스를 걸지 않은 경우, 증착된 탄탈막은 상당히 높은 약 250 $\mu\Omega\text{cm}$ 의 비저항값(그림 1(a))을 나타냈는데 음의 기판 바이어스를 걸어줌에 따라서 비저항값이 감소하고 있는 것을 알 수 있다. -125 V의 기판바이어스에서 증착된 박막이 가장 낮은 약 40 $\mu\Omega\text{cm}$ 의 비저항값(그림 1(b))을 보였으며 이후 -200 V까지 약간 증가하는 경향을 보였다. 이러한 비저항값의 변화는 서론에서 설명했듯이, 우선 기판 바이어스에 의해 증착된 박막의 밀도증가와 박막내의 결함의 감소에 의한 비저항값의 감소를 들 수 있으며, 둘째로는, 기판 바이어스에 의한 탄탈막의 상변화에서 원인을 찾을 수 있었다. 또한, 기

판 바이어스에 의한 탄탈막내의 불순물 감소가 비저항값의 감소에 영향을 주었을 것으로 생각되므로, 이에 대한 분석으로 우선 기판 바이어스를 걸지 않았을 경우와 -125 V에서 증착된 박막내의 산소, 탄소, 그리고 실리콘 불순물의 SIMS 깊이 분석을 하였다.

그림 2는 SIMS의 깊이 분석결과로 (a) 0 V와 (b) -125 V에서 증착된 탄탈 박막의 경우를 나타낸다. 여기서, 산소와 탄소 등의 불순물을 직접 검출하지 않고 세슘 이온빔을 이용한 클러스터(CsO, CsC) 상태의 이온으로 검출하였다. 세슘 클러스터를 이용한 검출은 단지 세슘 이온에 의한 이차 음이온의 검출보다는 감도가 떨어지지만, 다른 원소들과의 혼합 질량에 의한 분석결과와 신뢰성 감소, 예를 들면, 산소질량 16의 경우 CH_4 의 질량 16과 혼합되어 검출되는 경우 등을 배제하게 되어 보다 직접적인 분석결과를 얻기 때문에 이용하였

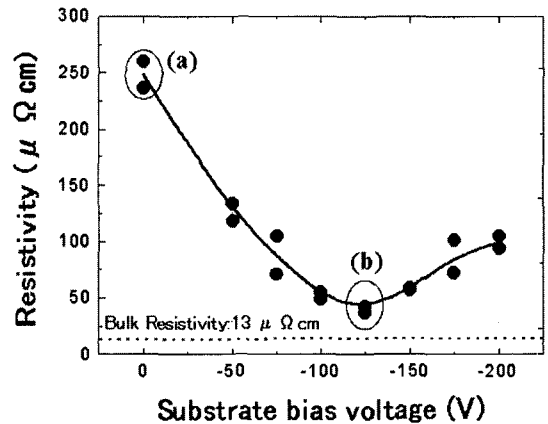


Fig. 1. Resistivity as a function of the negative substrate bias voltage.

Table 1. Analytical conditions of secondary ion mass spectrometry.

Primary ion source	Cs^+	O_2^+
Measured secondary ions (Secondary ion with high yield)	Negative ions (C, N, O, Cl etc)	Positive ions (Na, K, Ca, Fe etc)
Acceleration voltage	5 kV	5 kV
Beam current	50 nA	100 nA
Measured area	500 $\mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$	500 $\mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$
Pre-sputtering time	900 s	900 s

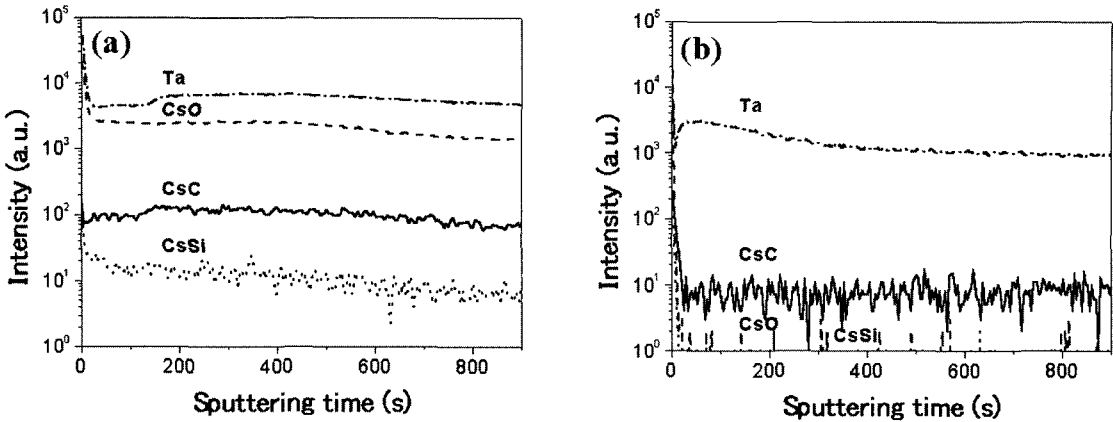


Fig. 2. SIMS depth profiles of the Ta films deposited at the substrate bias voltages: (a) 0 V and (b) -125 V.

다. 기관 바이어스를 걸지 않았을 경우, 그림 2(a)에서 보듯이, 탄탈 박막내부에 상당한 양의 산소와 탄소, 그리고 실리콘도 함유되어 있는 것을 알 수 있다. 특히 산소의 경우 저항값을 증가시키는데 가장 큰 영향을 주는 원소의 하나로써 비저항값이 상당히 높았던 것은 함유된 산소의 영향도 상당히 있는 것으로 사료된다. 실온의 경우 만약 구리내부에 산소의 양이 100 ppm 함유되어 있다면 구리의 비저항값을 $0.2 \mu\Omega\text{cm}$ 이상 증가시킨다고 알려져 있고 탄탈의 경우도 이와 비슷한 거동을 할 것으로 사료된다 [12]. 이에 비하여, -125 V에서 증착된 탄탈 박막의 경우는 전체적으로 불순물 농도가 상당히 감소했으며 특히 산소와 실리콘의 경우는 표면에 흡착되어 있는 경우를 제외하고는 거의 검출되지 않았다. SIMS의 깊이 분석 결과에서 보듯이, 음의 기관 바이어스가 탄탈 박막 내부의 탄소, 산소 그리고 실리콘 불순물의 농도를 감소시킨다는 것을 알 수 있다.

SIMS 분석에 있어서, 표면에서 스퍼터링 현상에 의해 방출되는 이차이온의 상대 이온화율은 조사하는 이온빔의 종류(Cs^+ , O_2^+ , O^+ , Ar^+ 등)에 의해 달라진다. Stroms 등 [13]에 의하면, 상대적으로 높은 이온화 포텐셜(ionization potential)을 가지고 있는 원소들은(C, O, Cl 등), 세슘 이온빔을 이용할 경우, 높은 이온화율을 얻을 수 있어 데이터의 신뢰성을 높일 수 있으며, 반대로 낮은 이온화 포텐셜을 가진 원소들의 경우는 산소 이온빔을

이용해 보다 정확한 분석감도를 얻을 수 있다고 보고하였다. 이와 같은 관점으로부터, 본 실험에서는 세슘 이온빔을 이용하여 분석한 결과에 대해서는 높은 이온화 포텐셜을 가지고 있는 원소(C, O, F, Cl 등)들을 중심으로 분석하였으며, 산소 이온빔의 경우는 그 밖의 낮은 이온화 포텐셜을 가진 원소들을 중심으로 분석하였다.

그림 3은 SIMS의 분석결과로 세슘(Cs^+) 이온빔을 이용한 경우의 (a) 탄탈 타겟과, (b) 0 V와 (c) -125 V에서 증착된 탄탈 박막내의 불순물 농도분포를 나타낸 것이다. 세슘 이온빔에 의해 방출된 이차 음이온들을 검출한 것으로 모든 불순물의 농도는 탄탈 원소의 농도에 대한 상대적인 값으로 나타낸 것이다. 탄탈 타겟의 경우, 수소, 탄소, 산소 그리고 이들의 결합에 의한 불순물(CH , OH_x)을 제외하곤 상당히 낮은 불순물 농도를 보였다. 이와 같이, 세슘 이온빔을 이용한 분석에서는 탄소, 질소, 산소와 같은 이온화율이 높은 원소들이 상대적으로 높은 농도를 나타나게 되므로 산소 이온빔의 경우보다 신뢰성이 높은 분석결과를 얻을 수 있다. 그림 3(b)에서 보듯이, 기관 바이어스를 걸지 않은 탄탈 박막의 경우, 탄탈 타겟에 비해 전체적으로 불순물의 농도가 상당히 증가했음을 알 수 있는데, 특히 탄소, 산소의 농도증가가 뚜렷하게 관찰되고 있다. 또한 불소와 염소의 불순물도 상당히 증가했음을 알 수 있다. 이외에도 탄탈 타겟에서 관찰되지 않았던 불순물들이 다수 포함

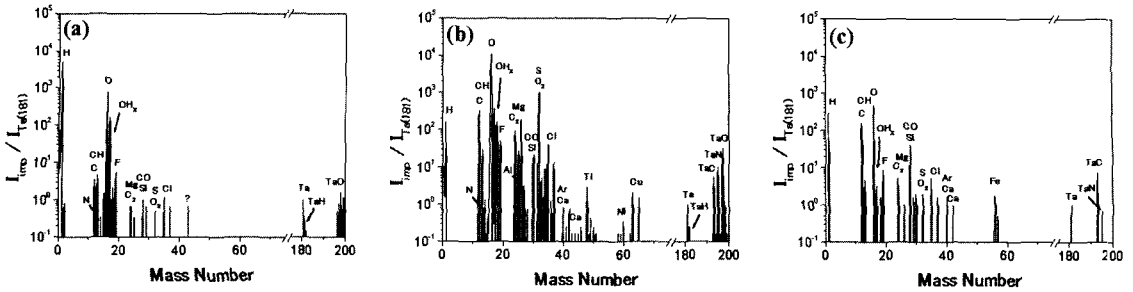


Fig. 3. SIMS results with Cs⁺ ion beam of the Ta films deposited at (a) Vs = 0 V and (b) Vs = -125 V.

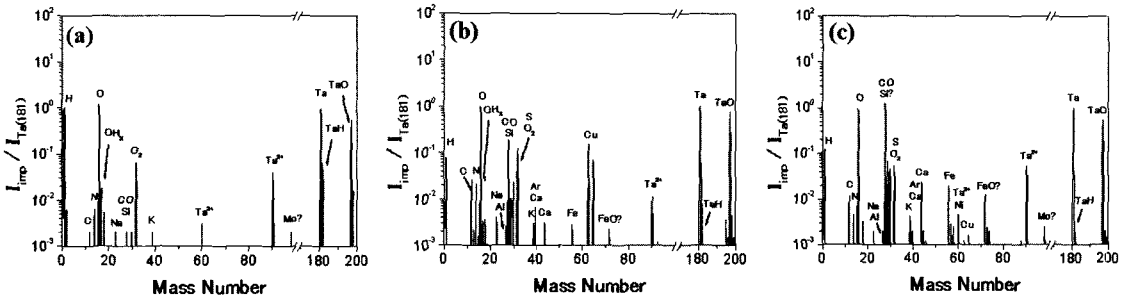


Fig. 4. SIMS results with O₂⁺ ion beam of the Ta films deposited at (a) Vs = 0 V and (b) Vs = -125 V.

되어 있는 것을 볼 수 있는데 이것은 박막 증착시 탄탈 타겟 이외의 챔버 내부에서 유입된 불순물들의 영향으로 보인다. 주목할 점은, 질량번호 190 이상의 영역에서 관찰된 몇 개의 피크들으로써, 이것은 순수한 불순물 원소의 피크가 아닌 탄탈과 다른 불순물들의 결합에 의한 피크로 나타난 것으로 보여진다. 예를 들자면, 질량번호 181의 탄탈과 질량번호 12의 탄소의 결합으로 질량번호 193의 TaC에 의해 피크가 관찰되기 때문이다. TaN 그리고 TaO의 경우도 마찬가지도 생각되어진다. 반면에, -125 V의 기판 바이어스를 걸었을 경우, 탄탈 박막의 불순물 농도를 보면, 기판 바이어스를 걸지 않은 경우와 비교해 상당한 차이가 나고 있음을 알 수 있는데, 전체적으로 불순물의 농도가 감소하였고 탄소와 산소, 그리고 불소와 염소의 농도가 현저히 감소하였다. 또한, 앞서 관찰되었던 TaN의 불순물 농도가 감소하였고 TaO의 경우는 관찰되지 않았는데, 이는 산소 불순물의 현저한 감소에 의한 것으로 보인다. 다만, 기판 바이어스에 의해 철 불순물이 증가했다는 것은 바람직하지 않은 예상치 못한 결과였는데, 아직 정확한 원인이 규명되진 않았지만 챔버 내 이온소스와 기

판사이에 위치한 스테인레스강관내의 철 성분에서 유입된 것으로 보인다. 이와 같이 음의 기판 바이어스에 의한 불순물의 농도변화에 관한 이유와 메커니즘에 대해서는 다음의 산소 이온빔의 SIMS 결과와 함께 논의될 것이다.

그림 4는 SIMS의 분석결과로 산소(O₂⁺) 이온빔을 이용한 경우의 (a) 탄탈 타겟과, (b) 0 V와 (c) -125 V에서 증착된 탄탈 박막내의 불순물 농도분포를 나타낸 것이다. 산소 이온빔에 의해 방출된 이차 양이온들을 검출한 것으로 이온화율이 큰 칼륨, 칼슘, 철, 니켈 등의 원소를 주목해서 관찰하였다. 위의 세슘 이온빔의 경우와는 달리, 기판 바이어스를 걸어줌으로써 증착된 탄탈 박막내에 구리 불순물을 제외한 칼륨, 칼슘, 철, 니켈 불순물의 농도가 약간 증가하였다. 다만, 기판 바이어스를 걸지 않은 탄탈 박막의 경우, 이온빔의 종류에 상관없이 예상치 못한 구리 불순물이 관찰되었는데, 이것은 구리로 만들어진 기판 홀더 또는 탄탈 타겟과 기판 사이에 놓여 있는 구리 그리드(grid) 내에 있는 성분에 의해 함유된 것처럼 보이므로 이에 대한 개선의 여지를 남겨두고 있다. 위의 두 가지 이온빔에 의해 얻은 결과를 종합해서 분석해

보면, 상당히 흥미로운 면을 볼 수 있는데, 그것은 탄탈 박막내의 불순물 농도가 음의 기판 바이어스에 의존한다는 것으로 불순물 종류에 따라 상당히 감소하거나 아님 약간 증가하는 경향을 보인다는 것이다. 말하자면, 탄소, 산소, 불소, 그리고 염소 등의 불순물은 음의 기판 바이어스에 의해 상당히 감소하였고 칼륨, 칼슘, 철, 그리고 니켈 같은 불순물은 음의 기판 바이어스에 의해 약간 증가하였다는 것이다.

여기서 생각되어지는 것은 증착 과정 중에 일어나는 이온화 메커니즘을 들 수 있는데, 고주파 아르곤 플라즈마 방전의 경우, 주로 페닝 이온화 효과(Penning ionization effect) [14] 를 들 수 있다. 페닝 이온화 효과는 전자에 의해 여기된 준안정 상태의 Ar^* (11.53 eV 와 11.72 eV) [15] 에 의한 Ta^0 의 이온화과정으로 다음과 같이 이루어진다. $Ar^* + Ta^0 \rightarrow Ta^+ + Ar^0 + e$, 여기서, 탄탈 증착입자의 이온화 포텐셜이 7.89 eV [16] 이므로 Ar^* 에 의해서 충분히 이온화되어지고, 또한 페닝 이온화에 의해 이온화된 탄탈 이온들에 의한 탄탈 타겟에서의 스퍼터현상에 의해서 이온화율이 더욱 증가될 것으로 사료된다. 따라서, 준안정 상태의 Ar^* 보다 낮은 이온화 포텐셜을 가진 원소(칼륨, 칼슘, 철, 니켈)들은 쉽게 이온화되고 음의 기판 바이어스에 의해 가속되어 박막 내에 농도증가로 이어질 것이다. 반면에, 이온화 포텐셜이 Ar^* 보다 높은 원소들은 페닝 이온화 과정에 의해 이온화되지 않으므로 기판 바이어스에 의한 영향을 받지 않을 것으로 생각된다. 염소와 산소 등이 이러한 원소에 속하게 되면 이들의 이온화 포텐셜은 12.97 eV와 13.62 eV [16] 이다. 다른 불순물에 비해 음이온화 되기 쉬운 경향을 가진 염소와 산소의 경우 음이온으로 될 가능성도 배제할 수 없다. 이 경우 음의 기판 바이어스는 음이온의 불순물들이 박막 내에 들어오는 것을 방지하는 역할을 하게 된다. 하지만 탄탈 박막 내에서 기판 바이어스를 걸었을 경우, 낮은 이온화 포텐셜을 가진 원소들의 농도증가는 위의 페닝 이온화 효과에 의해 설명되어지지만, 염소와 산소이외의 이온화 포텐셜이 높은 불순물의 경우의 상당한 농도 감소는 아직 설명되어지지 않는다. 따라서, 페닝 이온화

효과 이외의 또 다른 원인이 생각되어지는데, 이것은 기판 표면에서의 탄탈 이온들의 충격에 의한 크리닝(cleaning) 효과를 들 수 있다. Takagi [17] 에 의하면, 만약 증착되어지는 박막 표면에 물리적 또는 화학적으로 흡착되어 있는 불순물이 있다면 그들의 흡착에너지는 물리적인 경우, 대략 0.1 ~ 0.5 eV, 화학적인 경우, 대략 0.1 ~ 1.0 eV이며 이는 음의 기판 바이어스를 걸어줌으로써 가속된 높은 운동에너지를 가진 탄탈 이온들의 충돌에 의해 표면으로부터 제거될 가능성이 커지게 된다. 이러한 음의 기판 바이어스에 의한 탄탈 박막내의 불순물의 농도 변화에 대한 보다 정량적인 분석을 위해 Glow discharge mass spectrometry(GDMS)에 의한 정량 분석을 진행중이며 이후 충분한 분석결과를 바탕으로 음의 기판 바이어스와 불순물과의 관계에 대해서 고찰할 것이다.

4. 결 론

탄탈 박막의 증착시 음의 기판 바이어스에 의한 탄탈 박막내의 불순물 농도변화에 대해서 고찰하였다. 세슘 클러스터 이온에 의한 깊이분석에서, -125 V의 기판 바이어스를 걸어줌으로써 산소, 탄소, 그리고 실리콘 불순물의 농도가 기판 바이어스를 걸지 않은 경우에 비해 상당히 감소한 것을 알 수 있었다. 또한, 세슘 이온빔의 경우, 탄소, 산소, 그리고 불소 등의 이온화 포텐셜이 큰 불순물들의 농도가 음의 기판 바이어스에 의해 상당히 감소하였고, 산소 이온빔의 경우는 칼륨, 칼슘, 그리고 니켈 등의 이온화 포텐셜이 낮은 불순물들의 농도가 음의 기판 바이어스에 의해 약간 증가하였다. 이와 같이 탄탈 박막내의 불순물 농도가 음의 기판 바이어스에 의해 불순물 종류에 따라 농도가 상당히 감소하거나 아님 약간 증가했던 것은 박막 증착중의 이온화 과정인 페닝 이온화 효과와 탄탈 이온들의 기판 표면에서의 클리닝 효과에 의한 것으로 설명된다.

참 고 문 헌

[1] C. A. Chang and C. K. Hu, Appl. Phys. Lett.

- 57, 617 (1990).
- [2] T. Ohba, *Appl. Sur. Sci.* **91**, 1 (1995).
- [3] G. S. Chen, P. Y. Lee, and S. T. Chen, *Thin Solid Films* **353**, 264 (1999).
- [4] A. Z. Moshfegh and O. Akhavan, *Thin Solid Films* **370**, 10 (2000).
- [5] F. -H. Lu, S. -P. Feng, H. -Y. Chen, and J. -K. Li, *Thin Solid Films* **375**, 123 (2000).
- [6] K. Holloway, P. M. Fryer, C. Cabral, Jr., J. M. E. Harper, P. J. Bailey, and K. H. Kelleher, *J. Appl. Phys.* **71**, 5433 (1992).
- [7] P. N. Baker, *Thin Solid Films* **14**, 3 (1972).
- [8] H. J. Lee, K. W. Kwon, C. Ryu, and R. Sinclair, *Acta Mater.* **47**, 3965 (1999).
- [9] M. Shiojiri, S. Shinkai, K. Sasaki, H. Yanagisawa, and Y. Abe, *Jpn. J. Appl. Phys.* **42**, 4499 (2003).
- [10] 임재원, 배준우, Minoru Isshiki, *한국진공학회지* **12**, 174 (2003).
- [11] L. J. Van der Pauw, *Philips Res. Rep.* **13**, 1 (1958).
- [12] P. Gregory, A. J. Bangay, and T. L. Bird, *Metallurgia* **71**, 207 (1965).
- [13] H. A. Stroms, K. F. Brown, and J. D. Stein, *Anal. Chem.* **49**, 2023 (1977).
- [14] J. W. Coburn, and E. Kay, *Appl. Phys. Lett.* **18**, 435 (1971).
- [15] E. E. Muschlits, Jr., *Science* **159**, 599 (1968).
- [16] D. R. Lide, *Handbook of Chemistry and Physics* (New York CRC press) pp. 10-207.
- [17] T. Takagi, *Thin Solid Films* **92**, 1 (1982).