

Ruthenium CMP에서 Cerium Ammonium Nitrate와 알루미나 연마 입자가 연마 거동에 미치는 영향

Effect of Cerium Ammonium Nitrate and Alumina Abrasive Particles on Polishing Behavior in Ruthenium Chemical Mechanical Planarization

이상호¹, 이승호¹, 강영재¹, 김인권¹, 박진구^{1,a}

(Sang-Ho Lee¹, Sung-Ho Lee¹, Young-Jae Kang¹, In-Kwon Kim¹, and Jin-Goo Park^{1,a})

Abstract

Cerium ammonium nitrate (CAN) and nitric acid was used an etchant and an additive for Ru etching and polishing. pH and Eh values of the CAN and nitric acid added chemical solution satisfied the Ru etching condition. The etch rate increased linearly as the concentration of CAN increased. Nitric acid added solution had the high etch rate. But micro roughness of etched surfaces was not changed before and after etching. The removal rate of Ru film was the highest in 1 wt% abrasive added slurry, and not increased despite the concentration of alumina abrasive increased to 5 wt%. Even Ru film was polished by only CAN solution due to the friction. The highest removal rate of 120 nm/min was obtained in 1 M nitric acid and 1 wt% alumina abrasive particles added slurry. The lowest micro roughness value was observed in this slurry after polishing. From the XPS analysis of etched Ru surface, oxide layer was founded on the etched Ru surface. Therefore, Ru was polished by chemical etching of CAN solution and oxide layer abrasion by abrasive particles. From the result of removal rate without abrasive particle, the etching of CAN solution is more dominant to the Ru CMP.

Key Words : Ru CMP, Noble metal CMP, CAN, Etch rate

1. 서 론

최근의 반도체 소자는 웨이퍼 크기의 대직경화에 따른 대량 생산, 미세 선폭 감소에 의한 집적도의 향상 그리고 새로운 재료의 도입과 적용으로 인하여 날로 발전하고 있는 추세에 있다[1]. 특히 메모리 반도체 분야의 dynamic random access memory(DRAM)에서는 고집적도와 함께 캐패시터의 성능을 향상시키기 위해 캐패시턴스 값을 보다 증가시키기 위한 노력이 계속되어 왔다[2-4]. 캐패시턴스 향상을 위한 방법으로 캐패시터 공정에서

는 고유전율의 insulator 재료가 요구되고 있으며 현재 Ta₂O₅, (Sr,Ti)O₃ 그리고 (Ba,Sr)TiO₃ 등의 고유전막 재료가 연구되고 있다[5-9]. 뿐만 아니라 기존의 하부 전극 재료를 금속으로 대체하여 높은 유전율을 얻었다는 연구도 보고 되었다[10]. 기존의 캐패시터에서는 하부 전극으로 poly-Si을 사용하는 것이 일반적으로 하부전극인 poly-Si (semiconductor), 전극 사이의 절연 물질 (insulator), 그리고 상부를 금속(metal)으로 사용하는 것을 metal-insulator-semiconductor (MIS) 구캐패시터라고 한다. 그러나 poly-Si 대신 금속 하부 전극을 사용한 캐패시터를 metal-insulator-metal (MIM) 캐패시터라고 한다[11-13]. 하부 전극으로 금속을 사용한 MIM 구조의 캐패시터를 사용했을 때 캐패시터의 높이를 낮출 수 있는 장점이 있다.

MIM 구조의 캐패시터에서 하부 금속 전극으로

1. 한양대학교 금속재료공학과
(경기도 안산시 사동 1271)

a. Corresponding Author : jgpark@hanyang.ac.kr

접수일자 : 2005. 6. 30

1차 심사 : 2005. 7. 22

심사완료 : 2005. 8. 12

고려되고 있는 물질은 백금(Pt), 루테튬(Ru), 이리듐(Ir) 등의 백금족 원소들이다. 이 하부 전극 물질 중 Ru의 경우 다른 재료들보다 가공성이 우수하기 때문에 하부 전극으로의 도입이 용이하고 알려져 있다. 뿐만 아니라 Ru를 하부 전극으로 사용하였을 때 Ta₂O₅ 고유전막에 대하여 열처리 조건에 따라 유전 상수가 급격히 증가한다고 보고 되었으며 [10] 유전 상수의 증가는 곧 캐패시턴스 증가로 이어진다.

Ru 하부 전극을 이용하여 캐패시터를 형성하기 위해서는 각각의 캐패시터에 대한 절연 공정이 필수적이다. 캐패시턴스 값을 높이기 위해서 여러 개의 캐패시터를 형성해야 하지만 각각의 캐패시터를 공정 초기부터 절연하기에는 현실적으로 불가능하다. 그러므로 하부 전극 형성시 우선 Ru 전극 재료를 절연 물질 위에 증착시킨 다음 또는 하부 전극과 고유전막 그리고 상부 전극을 모두 증착시킨 뒤 각각의 캐패시터를 형성시키기 위해 각 캐패시터 사이에 절연 공정을 실행하게 된다. 이때 절연하기 위한 공정으로 etch back 공정[14,15] 또는 CMP 공정[16]의 도입이 제시되고 있다.

기존의 etch back 공정의 경우 Ru의 건식 에칭이 용이한 점을 이용하여 건식 에칭 공정으로 절연할 수 있다. 그러나 건식 에칭 후 캐패시터 상부 층이 균일하지 않으면 원래 설계된 캐패시턴스 값에 못 미치는 결과를 초래하게 된다. 그러므로 원하는 캐패시턴스 값을 얻기 위해서는 캐패시터 상부 층을 광역 평탄화하여 캐패시터의 높이를 일정한 수준으로 유지시키는 것이 관건이라 할 수 있다. 현재까지 광역 평탄화를 위한 공정 중 CMP 공정[17,18]이 가장 평탄화 효율이 높기 때문에 캐패시터 상부 층의 절연과 평탄화를 동시에 만족시키기 위해서 CMP 공정의 도입이 필요하다.

Ru CMP 공정을 위해서는 Ru를 화학적으로 에칭하기 위한 화학액의 선택이 필수적이다. 그러나 상온에서 Ru를 에칭 시킨다고 알려진 화학액이 거의 없어 CMP 공정에서의 슬러리를 제조하는 데에 적합한 화학액을 찾는 것이 쉽지 않다. 그러나 최근 질산과 cerium ammonium nitrate (CAN, (NH₄)₂Ce(NO₃)₆) 혼합 화학액이 Ru를 에칭 시킨다고 보고 되었다[16].

본 연구에서는 CAN과 질산 화학액을 사용하여 Ru 박막을 에칭하고 또한 연마 입자를 포함한 슬러리를 제조하여 CMP 거동을 관찰하였다. 그리고 에칭과 연마 후의 Ru 박막 표면의 분석을 통하여 CAN 화학액과 연마 입자가 Ru CMP 거동에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 재료 및 방법

8 인치 bare 실리콘 웨이퍼에 55 nm 두께의 TiN/Ti barrier layer를 형성한 뒤 120 nm 두께의 Ru 박막이 스퍼터링 방법에 의해 증착되었다. 그리고 8 인치 웨이퍼를 20 mm × 20 mm 크기로 절단하여 각각 에칭과 연마 실험에 사용하였다. Ru 표면을 에칭하고 연마하기 위해서 CAN을 사용하였으며, 에칭과 연마 특성을 향상시키기 위하여 질산을 사용하였다. CAN 또는 CAN과 질산 혼합 화학액을 제조한 후 각 화학액에 대하여 pH와 Eh를 CAN 농도 변화와 질산 첨가 유무에 따라 각각 분석하였다.

Ru 표면의 에칭은 상온에서 이루어졌으며 에칭 시간은 1분으로 고정하였다. Ru 표면의 연마 실험은 Logitech Co.의 PM 5TM 연마 장치와 Rodel Co.의 IC 1400TM(k-groove) 패드를 이용하여 수행되었다. 연마 입자로는 Degussa Co.의 AEROXIDE® AluC 알루미늄 (primary size = 13 nm) 입자를 사용하였다. 연마에 사용된 CMP 슬러리를 제조하기 위하여 CAN 또는 CAN과 질산이 혼합된 화학액에 알루미늄 연마 입자를 첨가한 뒤 지르코니아 bead를 이용하여 30분 동안 교반하였다. 연마시 carrier와 platen 회전 속도는 50 rpm으로 고정하였으며, 6.5 psi 압력 조건에서 1 분간 연마가 이루어졌다. 연마 공정 동안 슬러리의 공급은 분당 150 ml로 일정하게 유지되었다. 에칭과 연마 공정이 끝난 후에 각각 초순수로 Ru 샘플 표면에 잔류하는 화학액과 슬러리 잔류물을 제거한 뒤 초고순도 질소 가스를 이용하여 건조하였다.

Ru 박막의 연마율과 에칭된 두께는 Chang Min Tech. Co.의 four point probe(CMT-SR 1000N)를 사용하여 측정하였으며 에칭과 연마 후의 Ru 박막 표면을 PSIA Co.의 atomic force microscope (AFM, AutoProbe CP Research)를 이용하여 분석하여 표면 미세 거칠기를 분석하였다. 또한 에칭 후 Ru 표면을 XPS로 분석하여 Ru 산화막의 형성 여부에 대해 알아보았다.

3. 결과 및 고찰

그림 1은 CAN 농도 변화와 질산의 첨가 유무에 따른 pH와 Eh 값 변화를 보여주고 있다. CAN 농도가 초기 0.01 M 농도에서 0.1 M 농도로 증가함에 따라 급격한 pH 변화는 보이고 있지 않다. 질산이 첨가되지 않은 CAN 화학액에서의 pH는 초

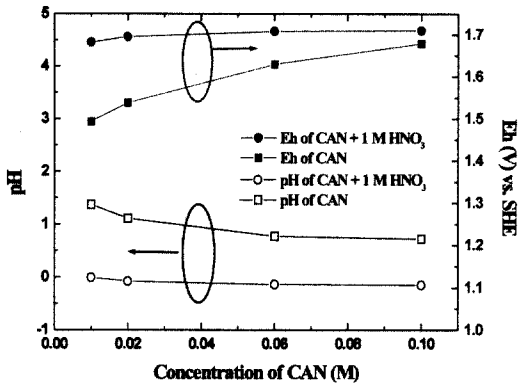


그림 1. CAN 농도에 따른 에칭액의 pH와 Eh.
 Fig. 1. pH and Eh of the etching solution as a function of concentration of CAN.

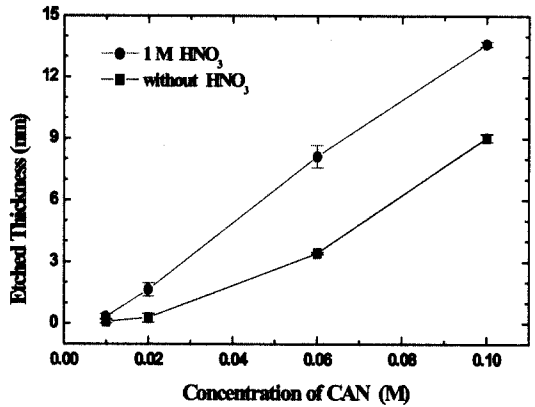


그림 3. CAN 에칭액에서 1 분 에칭 후의 에칭 두께.
 Fig. 3. Etched thickness after 1 min static etching in CAN etching solution.

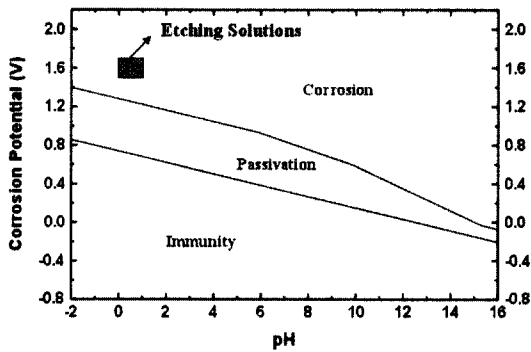


그림 2. Ru의 Pourbaix diagram[19].
 Fig. 2. Schematic pourbaix diagram of ruthenium and water system[19].

기 1보다 큰 값에서 0.8까지 약간 감소하였으나 질산이 첨가된 CAN 화학액에서는 모든 농도에서 pH가 거의 0에 가까운 값을 가지면서 일정하게 유지됨을 알 수 있다. Eh의 경우 질산이 첨가되지 않은 순수한 CAN 화학액의 경우 약 1.5 V에서 1.7 V로 약간 증가하였으나 질산이 첨가된 CAN 화학액의 경우 1.7 V에서 거의 변화하지 않고 일정하게 유지되었다.

측정된 pH와 Eh 값을 그림 2에서와 같이 Pourbaix pH-Potential diagram[19]에 나타내었다. 일반적으로 Ru은 그림에서 보는 바와 같이 전 pH 영역에서 passivation과 corrosion 영역이 존재하는 반면 전혀 화학액과 반응하지 않는 영역도 동시에

존재한다. 이 때문에 적절한 pH와 Eh 조건을 만족시키지 못하면 Ru 표면을 전혀 에칭할 수 없다. 그러나 실험에 사용된 CAN 화학액과 질산이 첨가된 CAN 화학액은 모두 corrosion 영역에 존재하므로 Ru 박막을 에칭시킬 수 있다. 또한 이러한 화학액에 연마 입자를 첨가하여 제조한 슬러리를 사용하였을 경우, 화학액에 의한 에칭과 연마 입자에 의한 기계적인 가공이 동시에 Ru 연마에 영향을 주게 되므로 CMP 슬러리에 적합하다.

그림 3은 CAN 화학액 농도와 질산 첨가 유무에 따른 에칭 두께를 나타내고 있다. 초기 CAN 농도가 0.02 M 농도로 낮을 때에는 에칭 두께가 2 nm 미만으로 매우 낮았으나 농도가 0.1 M 농도로 증가하였을 경우, 크게 증가하였다. 질산 1 M이 첨가된 경우에는 첨가되지 않았을 때의 평균 9 nm 두께보다도 큰 약 13.5 nm의 두께만큼 박막이 에칭되었다. 질산이 첨가된 경우 에칭 두께의 변화가 직선적으로 증가하고 있음을 알 수 있으며 0.01 M 농도를 제외한 모든 구간에서 질산이 첨가되지 않은 CAN 화학액보다 높은 에칭 두께가 관찰되었다. 이와 같이 질산 1 M이 첨가된 경우에는 그림 1에서의 결과에서 보는 바와 같이 더 낮은 pH와 더 큰 Eh 값을 가지므로 에칭 특성이 질산이 첨가되지 않은 CAN 화학액보다 우수한 것임을 알 수 있다.

에칭된 Ru 박막의 표면을 AFM으로 표면 미세 거칠기 분석을 하였다. 에칭 실험 중 가장 높은

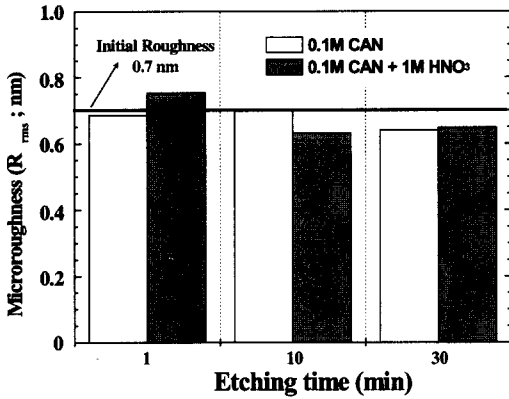


그림 4. 0.1 M CAN 용액과 1 M 질산 첨가된 CAN 에칭 용액에서 에칭 후 Ru 표면의 미세 거칠기.

Fig. 4. Microroughness of static etched ruthenium at 0.1 M CAN and 1 M HNO₃ added etching solution.

0.1 M 농도의 CAN 화학액과 이 화학액에 1 M의 질산을 첨가한 화학액에 대하여 분석한 결과 그림 4에서 보는 바와 같이 표면의 미세 거칠기는 에칭하기 전의 표면에 비해 크게 증가하지 않았다. 또한 에칭 시간을 10 분과 30 분으로 증가시켜 에칭하여도 표면에서의 미세 거칠기 변화는 거의 관찰되지 않았다. 이것은 CAN 화학액이 Ru 표면을 에칭하지만 샘플 표면의 전면에 대해 고르게 에칭이 일어나고 있으며 질산이 첨가되어 에칭 두께가 증가함에도 불구하고 표면의 미세 거칠기가 크게 증가하지 않는다는 것을 의미한다. 그러므로 질산이 첨가된 CAN 화학액을 사용하여도 원하는 에칭 특성을 얻을 수 있으며 표면의 미세 거칠기에 영향을 주지 않는 슬러리를 Ru CMP에 사용할 수 있다.

그림 5는 Ru 박막 에칭에 사용된 화학액에 1 wt%의 알루미나 연마 입자를 첨가하여 제조한 슬러리로 Ru 박막을 연마한 후의 연마율에 대한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 CAN 화학액의 농도가 증가할수록 Ru 박막의 연마율이 증가하는 경향을 보이고 있다. 질산이 첨가되지 않은 CAN 화학액에서는 연마율이 직선적으로 증가하고 있으며 0.01 M 농도에서 약 10 nm/min의 연마율이 0.1 M 농도로 증가하였을 때 90 nm/min으로 증가하였다. 그러나 질산이 첨가된 경우에는 CAN 화학액의 농도가 0.01 M 농

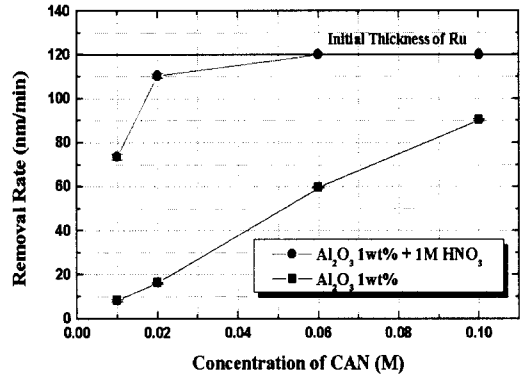


그림 5. 1 wt% 알루미나 연마 입자 첨가된 CAN 슬러리에서 질산 1 M 첨가 유무와 CAN 농도 변화에 따른 Ru의 연마율.

Fig. 5. Removal rate of Ru as a function of CAN concentration with and without 1 M HNO₃ at 1 wt% alumina abrasive particles.

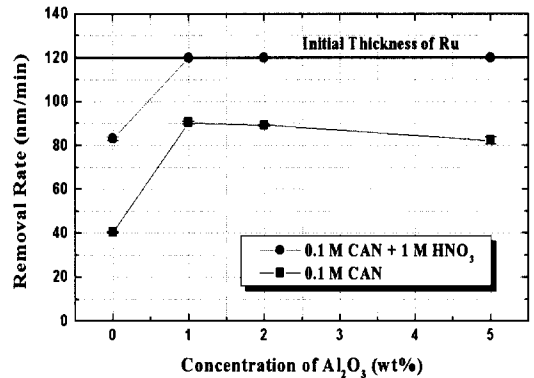


그림 6. 알루미나 연마 입자 농도에 따른 연마율.

Fig. 6. Removal rate at the different concentration of alumina abrasive particles.

도로 낮음에도 불구하고 약 70 nm/min의 비교적 높은 연마율을 나타내고 있으며 0.06 M 농도 이상에서는 초기에 증착한 Ru 박막이 모두 연마되는 것을 관찰하였다. 이와 같이 질산이 첨가된 슬러리에서 높은 연마율이 나타나고 있는 것은 그림 3에서 설명한 바와 같이 질산이 첨가된 화학액 내에

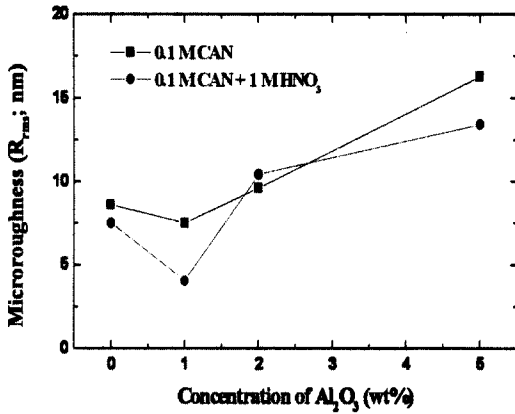


그림 7. 연마 후 Ru 표면의 미세 거칠기.
Fig. 7. Microroughness of polished Ru surface.

서의 에칭이 질산이 첨가되지 않은 CAN 화학액보다 더 많이 일어나기 때문이다.

알루미나 연마 입자의 혼합 비율을 1 wt%에서 5 wt%로 증가시켜도 Ru 박막의 연마율은 크게 변하지 않았으며 오히려 알루미나 연마 입자가 없이 순수한 화학액만을 이용하여 연마하여도 40 nm/min, 82 nm/min의 연마율이 0.1 M CAN 화학액과 이 화학액에 1 M의 질산을 첨가한 화학액에서 각각 얻어졌다. 이와 같은 결과는 연마 입자가 연마에 기여하는 것보다 CAN 화학액이 실제 Ru 박막의 CMP에 훨씬 더 많은 영향을 미치고 있다는 것을 알게 해준다. 질산 1 M이 첨가된 슬러리에서는 알루미나 연마 입자를 1 wt%만 첨가하여도 증착된 모든 Ru 박막이 제거되는 결과를 얻었다. 그림 6은 알루미나 연마 입자 첨가량 변화에 따른 연마율을 보여주고 있다.

연마 공정 후의 Ru 표면에 대한 표면 미세 거칠기 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 알루미나 연마 입자의 농도가 1 wt% 첨가된 슬러리에서 가장 낮은 미세 거칠기 값이 측정되었으며 알루미나 연마 입자의 농도가 2 wt%와 5 wt%로 증가하였을 때에 표면 미세 거칠기가 증가하였다. 이는 알루미나 연마 입자의 농도가 증가하여 보다 많은 입자가 연마 과정에 영향을 주기 때문에 표면의 미세 거칠기도 증가한 것이다. 알루미나 연마 입자를 첨가하지 않은 화학액으로만 연마하였을 때에는 초기 Ru 박막이 가지고 있는 미세 거칠기와 비교하여 크게 차이가 나지 않으며 또한 에칭한 표면에서의 결과와도 거의 일

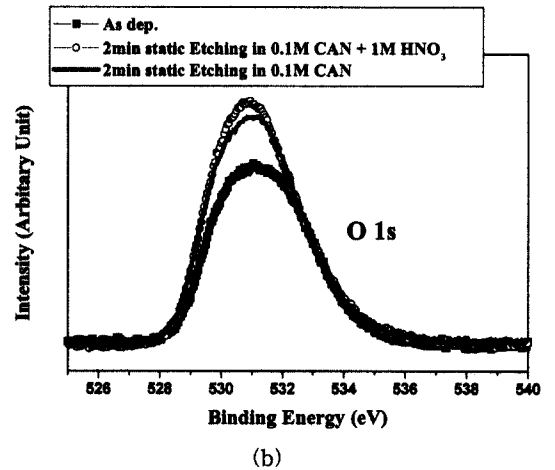
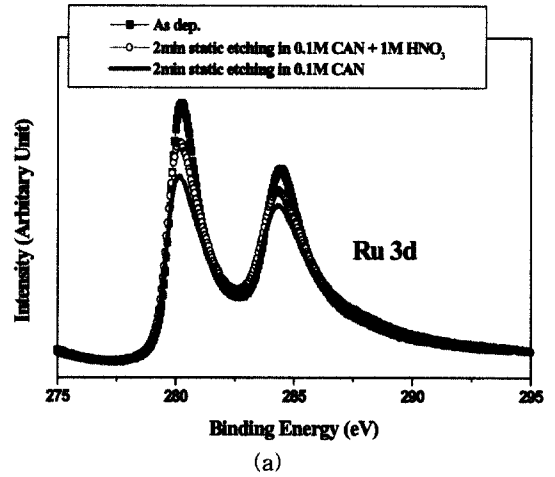


그림 8. 2 분간 에칭한 Ru 표면의 (a) Ru 3d와 (b) O 1s 에서의 XPS 결과.

Fig. 8. XPS results of 2 min etched Ru surface at (a) Ru 3d and (b) O 1s. Microroughness of polished Ru surface.

치하고 있음을 알 수 있다. 그렇지만 알루미나 1 wt% 연마 입자가 첨가된 슬러리에서는 오히려 미세 거칠기가 소폭 감소하였다. 이와 같은 결과는 연마하기 이전의 Ru 박막의 표면과 화학액으로 에칭한 표면의 거칠기가 비교적 큰 값을 가지고 있었으며, 이러한 거친 박막의 표면이 연마 입자에 의해 연마됨에 따라 표면 미세 거칠기 값이 감소한 것이다.

CAN 화학액이 Ru 박막에 미치는 영향을 알아

보기 위하여 에칭 후 Ru 박막 표면에 대한 XPS 분석을 실시하였으며 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 일반적인 금속 CMP 공정은 슬러리 내의 화학액에 의한 금속 박막의 에칭과 산화제에 의해 금속 표면에 산화막이 형성된 이후 이 산화막이 연마 입자에 의해 연마가 되는 과정으로 널리 알려져 있다[20]. 에칭된 Ru 표면에 대해서 XPS 분석을 실시한 결과 그림 8(a)에서는 Ru 3d peak이 Ru 에칭에 의하여 감소한 것으로 보인다. 그러나 그림 8(b)에서 보는 바와 같이 O 1s peak이 증가한 것으로 보아 표면에 Ru 산화막이 형성된 것을 확인할 수 있다. 그러므로 연마 과정에서 CAN 화학액이 Ru 표면을 에칭함과 동시에 미세한 산화막이 형성된다는 것을 알 수 있다.

따라서 CAN 화학액과 알루미늄 연마 입자를 사용한 Ru CMP에서는 CAN 화학액의 에칭 작용, CAN 화학액에 의한 미세 산화막의 형성과 알루미늄 연마 입자에 의한 산화막의 제거가 주로 영향을 미치는 요소이다. 그러나 연마 입자의 첨가량이 증가해도 연마율이 증가하지 않았으며 오히려 연마 입자 없이 Ru 박막을 연마하였을 때에도 비교적 높은 연마율이 관찰됨으로 보아 CAN 화학액의 화학적 에칭이 보다 많은 영향을 준다는 사실을 알 수 있다.

4. 결 론

CAN 화학액과 알루미늄 연마 입자 그리고 질산을 첨가제로 사용하여 Ru 박막에 대한 CMP 거동을 살펴보았다. CAN 화학액과 질산이 첨가된 CAN 화학액 모두 Ru를 충분히 에칭시킬 수 있다는 것을 화학액에 대한 pH, Eh 값을 측정하여 Ru의 Pourbaix diagram과 비교하여 확인하였다. CAN 화학액의 농도가 증가함에 따라 Ru 박막의 에칭 두께가 증가하였으며 질산 1 M이 첨가되었을 때에 에칭이 가속화 되었다. 그러나 에칭한 Ru 박막의 표면 미세 거칠기는 크게 증가하지 않았다. 에칭에 사용된 CAN 화학액에 알루미늄 연마 입자를 첨가하여 슬러리를 제조하였으며 1 wt%의 연마 입자만 첨가되어도 연마율이 크게 향상되어 0.1 M CAN과 1 M의 질산 화학액에 대해 120 nm/min의 높은 연마율을 얻을 수 있었다. 그렇지만 연마 입자의 농도를 5 wt%로 증가시켜도 연마율은 크게 변하지 않았으며 일정하게 유지되었다. 연마 입자가 첨가되지 않은 CAN과 질산 혼합 화학액에서도 82 nm/min의 연마율이 관찰되었으며 이는

CAN 화학액이 연마에 보다 많은 영향을 준다는 것을 알게 해준다. 또한 연마 후 표면의 미세 거칠기는 가장 연마율이 높은 1 wt% 알루미늄 연마 입자가 첨가된 슬러리 조건에서 가장 좋은 결과를 나타내었다. 에칭 후 Ru 표면에 대한 XPS 분석을 통해 O 1s peak이 에칭된 Ru 표면에서 증가하는 것을 관찰하였으며 이는 CAN 화학액이 Ru 표면을 에칭함과 동시에 미세한 산화막을 시킨다는 것을 나타낸다.

그러므로 CAN 화학액과 알루미늄 연마 입자와 질산 첨가제를 사용한 Ru CMP에서는 CAN 화학액에 의한 Ru 표면의 에칭과 CAN 화학액에 의해 형성된 미세 산화막의 연마 입자에 의한 제거가 Ru CMP에 영향을 주는 요소이며 CAN 화학액의 작용이 보다 중요하다.

감사의 글

이 논문은 2001년 한양대학교 교내연구비 지원으로 연구되었음.

참고 문헌

- [1] C. Y. Chang and S. M. Sze, "ULSI Technology", McGraw-Hill, Intl. ed., p. 2, 1996.
- [2] Y. Kawamoto and T. Kaqa, "A 128 um² bit-line shielded memory cell technology for 64 Mb DRAM", Proc. the Symp. on VLSI Technol., p. 13, 1990.
- [3] T. Ema, S. Kawanago, and T. Nishida, "3-dimensional Stacked Capacitor cell for 16 M and 64 M DRAM's", IEDM Tech Dig, p. 592, 1988.
- [4] M. Ino, J. Miyano, H. Kurogi, H. Tamura, Y. Nagatomo, and M. Yoshimaru, "Rugged surface polycrystalline silicon film deposition and its application in a stacked dynamic random access memory capacitor electrode", J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 14, Iss. 2, p. 751, 1996.
- [5] C. H. Liu, S. J. Chang, J. F. Chen, S. C. Chen, J. S. Lee, and U. H. Liaw, "High-quality ultrathin chemical-vapor-deposited Ta₂O₅ capacitors prepared by high-density

- plasma annealing", *Mat. Sci. and Eng. B*, Vol. 106, Iss. 3, p. 234, 2004.
- [6] H. J. Kim, J. S. Song, I. S. Kim, and S. S. Kim, "Electrical characteristics of Ti-O/Ta₂O₅ thin film sputtered on Ta/Ti/Al₂O₃ substrate", *Thin Solid Films*, Vol. 446, Iss. 1, p. 124, 2004.
- [7] R. A. McKee, F. J. Walker, and M. F. Chisholm, "Physical structure and inversion charge at a semiconductor interface with a crystalline oxide", *Science*, Vol. 293, Iss. 5529, p. 468, 2001.
- [8] A. Kumar and S. G. Manavalan, "Characterization of barium strontium titanate thin films for tunable microwave and DRAM applications", *Surf. and Coat. Technol.*, Vol. 198, Iss. 1-3, p. 406, 2005.
- [9] T. Kuroiwa, Y. Tsunemine, T. Horikawa, T. Makita, J. Tanimura, N. Mikami, and K. Sato, "Dielectric properties of (Ba_xSr_{1-x})TiO₃ thin films prepared by RF sputtering for dynamic random access memory application", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 33, No. 9B, p. 5187, 1994.
- [10] K. Kishiro, N. Inoue, S.-C. Chen, and M. Yoshimaru, "Structure and electrical properties of thin Ta₂O₅ deposited on metal electrodes", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 37, No. 3B, p. 1336, 1998.
- [11] Ch. Wenger, R. Sorge, T. Schroeder, A. U. Mane, G. Lippert, G. Lupina, J. Dąbrowski, P. Zaumseil, and H. -J. Muessig, "MIM capacitors using amorphous high-k PrTi_xO_y dielectrics", *Microelectronic Eng.*, Vol. 80, p. 313, 2005.
- [12] S. J. So, D. S. Oh, H. K. Sung, and C. B. Park, "Fabrication of MIM capacitors with 1000 Å silicon nitride layer deposited by PECVD for InGaP/GaAs HBT applications", *J. Crystal Growth*, Vol. 279, Iss. 3-4, p. 341, 2005.
- [13] T. H. Perng, C. H. Chien, C. W. Chen, P. Lehnen, and C. Y. Chang, "High-density MIM capacitors with HfO₂ dielectrics", *Thin Solid Films*, Vol. 469-470, p. 345, 2004.
- [14] B. S. Ju and H. W. Kim, "A concave-type structure of a Ru electrode capacitor fabricated by the reactive ion etching method", *Microelectronic Eng.*, Vol. 70, Iss. 1, p. 30, 2003.
- [15] H. W. Kim, B. S. Ju, and C. J. Kang, "Investigation into the patterning of a concave-type Pt electrode capacitor using the reactive ion etching method", *Microelectronic Eng.*, Vol. 65, Iss. 4, p. 489, 2003.
- [16] W. J. Lee and H. S. Park, "Development of novel process for Ru CMP using ceric ammonium nitrate (CAN) containing nitric acid", *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 228, Iss. 1-4, p. 410, 2004.
- [17] 김상용, 서용진, 김태형, 이우선, 김창일, 장의구, "Chemical mechanical polishing (CMP) 공정을 이용한 multilevel metal 구조의 광역 평탄화에 관한 연구", *전기전자재료학회논문지*, 11권, 12호, p. 1084, 1998.
- [18] 이우선, 고필주, 김남훈, 서용진, "산화제 첨가에 따른 WO₃ 박막의 CMP 평탄화 특성", *전기전자재료학회논문지*, 18권, 1호, p. 12, 2005.
- [19] M. Pourbaix, "Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions", *N. A. C. E. Intl.*, Houston, TX., p. 346, 1974.
- [20] F. Kaufman, D. B. Thompson, R. E. Boradie, M. A. Jaso, W. L. Guthrie, D. J. Peason, and M. B. Small, "Chemical mechanical polishing for fabricating W metal features as chip interconnects", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 138, No. 11, p. 3460, 1991.