

차세대 노광공정용 Ta 박막의 0.2 μ m 미세패턴 식각특성 연구

우상균 · 김상훈 · 주섭열 · 안진호
한양대학교 재료공학부

Study on the Etching Characteristics of 0.2 μ m fine Pattern of Ta Thin film for Next Generation Lithography Mask

Sang-Gyun Woo, Sang Hoon Kim, Sup-Youl Ju and Jinho Ahn
Dept. of Materials Engineering, Hanyang Univ.

(2000년 5월 13일 받음, 2000년 10월 23일 최종수정본 받음)

초 록 본 연구에서는 Electron Cyclotron Resonance plasma etching system 을 이용한 Ta 박막의 미세 식각 특성을 연구하였다. 염소 plasma를 사용하여 microwave power, RF power, working pressure, gas chemistry 등의 변화에 따른 식각 profile의 영향을 조사하였고, pattern density가 증가함에 따라 발생하는 microloading 현상을 0.2 μ m 이하의 패턴에서 확인 하였다. 이를 개선하기 위하여 식각 과정을 두 단계로 분리하는 2단계 식각 공정을 수행하였으며 이를 통해 우수한 식각 profile을 얻을 수 있었다.

Abstract In this research, the etching characteristics of Ta thin film with chlorine plasma have been studied by Electron Cyclotron Resonance (ECR) plasma etching system. The effects of microwave power, RF bias power, working pressure and gas chemistry on the etching profiles have been investigated. The microloading effect, which was observed at fine pattern formation, was effectively suppressed by double step etching, and anisotropic 0.2 μ m L&S patterns were successfully generated.

Key words : plasma etching, microloading effect, microwave power, double step etching, Ar actinometry

1. 서 론

차세대 반도체 기술은 0.1 μ m 급 이하의 패턴 형성을 필요로 하며, 이를 실현하기 위한 다양한 차세대 노광 기술에서는 silicon process를 이용한 새로운 구조의 마스크를 필요로 한다. 최근 이와 같은 차세대 노광 공정용 마스크를 구성하는 중요한 요소 중 하나인 광흡수 혹은 광산란 패턴에 대한 연구가 활발히 진행 되어 오고 있다.¹⁾ 그러나, 위와 같은 패턴의 형성을 위해서는 high aspect ratio의 금속막에 대한 이방성 (anisotropic) 식각 기술을 필요로 하고, 적절한 식각 속도와 패턴의 밀도가 증가할 때 발생하는 microloading 현상²⁻⁵⁾을 제어할 수 있는 공정에 대한 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 차세대 노광 마스크의 패턴물질로 많이 연구되고 있는 Ta 금속막에 high aspect ratio의 미세패턴을 형성하기 위하여 식각 공정시 작용하는 각각의 변수들에 대한 독립적 제어가 가능하여 이러한 변수들이 식각 공정에 미칠 수 있는 영향을 개별적으로 고찰할 수 있는 Electron Cyclotron Resonance (ECR) plasma etching system을 이용하여 식각 공정을 수행하였다. 또한 Cl₂ gas를 이용한 식각공정 중 생성되는 부산물인 TaCl₅의 끓는점 (242 $^{\circ}$ C)은 다른 일반적인 Si 공정에서 생기는 식각부산물보다 높기 때

문에 Ta의 식각은 ion에 의한 sputtering이 주요인자로 작용하는 ion-assisted 공정이라 알려져 있으며 이에 따라 loading effect가 줄어들어 Ta 금속의 미세패턴을 형성시키기 위해서는 Cl plasma가 적합하다고⁶⁾ 받아 들여지고 있어 Cl을 식각 gas로 이용하였다. 한편 스퍼터링 증착된 Ta 막은 columnar 구조를 통한 산소 확산에 의해 산화막이 형성된다는 보고가 있어⁷⁾, 이 표면의 native oxide의 존재에 따른 식각공정의 최적화가 필요한 실정이다.

2. 실험 방법

Si (100)에 etch stop layer 재료인 SiO₂ (300Å)를 sputter 증착하고, Ta 금속은 DC magnetron sputtering으로 DC power 40W, 공정 압력 10mTorr에서 3000Å 두께로 증착하였다. 그 위에 다시 hard mask로 SiO₂를 RF sputter로 증착하였는데, 초기 진공 4 \times 10⁻⁶ Torr, working gas로는 Ar과 O₂를 3대 1의 비율로, 공정 압력은 7 mTorr, RF power는 70 W로 500Å을 증착시켰다. SiO₂ hard mask는 SF₆와 N₂를 사용하여 플라즈마 식각하였다.

발전기에서 생성되는 microwave source의 진동수 (2.45GHz)와 waveguide 상에 위치해 있는 magnet (875gauss)에 의해 원운동을 일으키는 전자들의 진동수가

일치할 때 생성되는 공명 현상에 의해 10^{13}cm^{-3} 이상의 고 밀도 plasma를 형성 시키는 ECR plasma 장비를 사용하여 Cl_2 gas와 Ar gas의 혼합비(0~20%), microwave power(750-1200 W), RF power(0-150 W) 그리고 공정 압력(3-15 mTorr)의 변화에 따른 식각 특성을 조사하였다. 그리고 각 변수들간의 상관관계를 정성적으로 파악하기 위해 Optical Emission Spectroscopy(OES)를 이용한 Ta 표면의 native oxide 제거시간 경향성을 관찰하였는데, 이는 Ta 식각시에는 Cl radical의 양이 오히려 증가하게 된다는 사실⁹⁾을 이용한 것으로 최초 공정시작부터 Cl radical의 emission intensity가 갑자기 증가하게 되는 시간까지를 native oxide 제거시간이라 할당하였고, 플라즈마 내의 원소양의 변화는 total flow(15sccm)의 4%에 해당하는 Ar을 actinometer로 사용한 Ar actinometry 방법으로 atomic Cl density 변화를 관찰하였으며⁸⁾, 그에 따른 식각 profile의 변화는 Field Emission Scanning Electron Microscopy(FESEM)을 이용하여 관찰하였다. Ta 박막을 식각하는 동안 패턴 폭이 감소하면서 0.2 μm 패턴 형성시 microloading 현상이 관찰되었는데 이의 개선을 위해 step 식각을 시도하였다. 이때의 조건은 첫 단계에서는 microwave power 900W, RF power 150W, 공정 압력 3mTorr로 하였고, 두 번째 단계에서는 microwave power를 1200W로 증가시켰다. 그리고 두 step 사이에 5분 동안 진공을 유지시켜 주었다.

3. 결과 및 고찰

식각에 사용되는 각각의 변수들은 sheath 영역에서의 self bias에 의해 형성된 electric field에 의한 가속과 scattering등의 상호 작용에 의한 momentum 변동에 크게 영향을 받는ion의 물리적인 효과와, 전기적으로는 중성이지만 화학적으로 불안정 상태에 있는 radical에 의한 화학적 효과에 영향을 미치는 두가지 종류로 분류될 수 있으며, ECR plasma etching system에서는 물리적 식각에 주요하게 작용하는 변수로 RF power, working pressure, Ar flow rate 변화 등이 있고 화학적 식각에 주요하게 작용하는 변수로 microwave power, 식각 gas 종류등이 있다. 본 실험에서 기준 조건으로 설정한 순수 Cl_2 15sccm, 공정압력 3 mTorr, microwave power 900W, RF power 150W에서의 OES spectrum을 그림 1에 나타내었다. 그리고 Cl emission intensity는 725.6nm를 기준으로 분석⁶⁾하였으며, microwave power에 따른 식각 전후와 식각중에 발생하는 Cl radical 양의 변화결과를 그림 2에 나타내어 Ta 식각은 TaCl_x 가 TaCl_{x-1} 과 Cl로 분해되는 반응을 동반한다는 결과⁶⁾를 확인할 수 있었다.

RF 변화에 따른 효과

첫 번째로 RF power를 변화시킬 때 이에 따른 식각 profile의 변화를 그림 3에서 나타내었다. RF power는 Ta 식각시에 electron과 ion 간의 mobility 차이에 의해 발생하는 self-bias에 의해 ion-assisted 식각을 유도하게 된다. Ta 표면에는 oxide가 형성 되어 있고 이러한 oxide는

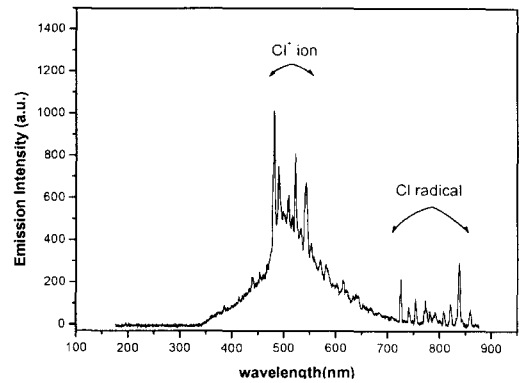


Fig. 1. OES spectrum of Cl_2 ECR plasma(Typical emission lines are indicated)

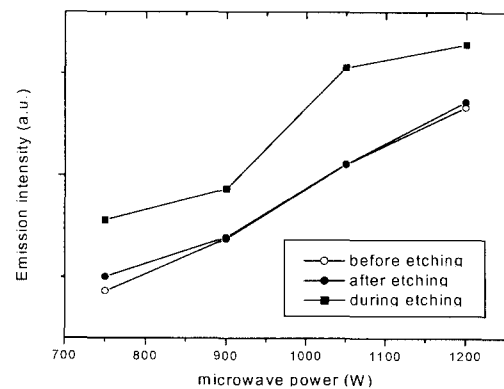


Fig. 2. Cl emission intensity at 725.6nm in OES spectra as a function of microwave power measured before, during and after Ta etching process (Cl_2 flow: 15sccm, process pressure: 3 m Torr, RF power: 15W)

물리적 sputtering에 의해 식각이 활성화되며^{7,9,10)}, 이 공정이 마무리 된 후에 Cl radical과 ion에 의한 anisotropic 식각이 진행이 된다. 그런데 RF power가 너무 낮으면 Ta 표면의 oxide제거를 위한 충분한 energy가 공급이 되지 못하여 낮은 식각률을 갖게 된다고 볼 수 있으며 이는 그림 4의 결과를 통해 확인할 수가 있었다. 이 실험들을 통하여 RF power가 실험영역에서 가장 높은 150W일 때 최적의 식각 profile을 얻게 됨을 알 수가 있었고, RF power 변화에 따른 원소 분포의 변화는 OES를 이용한 Ar actinometry를 통해 알 수가 있었으며 결과는 그림 4와 같다. RF power가 증가함에 따라 Cl radical 양의 변화가 거의 없었음을 통해 이러한 식각결과는 radical의 변동과는 독립적인 물리적 식각이 지배적이었음을 알 수가 있다.

공정압력 변화에 따른 효과

그림 5에서는 공정 압력에 따른 식각 profile 변화를 나타내었으며, 3, 8, 15 mTorr의 3가지 조건중 3mTorr에서 최적의 식각 profile을 얻었다. 그림 6은 Ta 표면의 native oxide 제거 시간과 공정 압력 변화에 따른 Ar actinometry 분석 결과를 나타낸 것으로 공정 압력의 세기와 oxide 제거 시간은 비례함을 알 수가 있었다. 이는 공정 압력이 증가할수록 식각 반응종의 양이 증가하고 chamber 내에서의 빈번한 scattering이 발생하여 식각 이온의

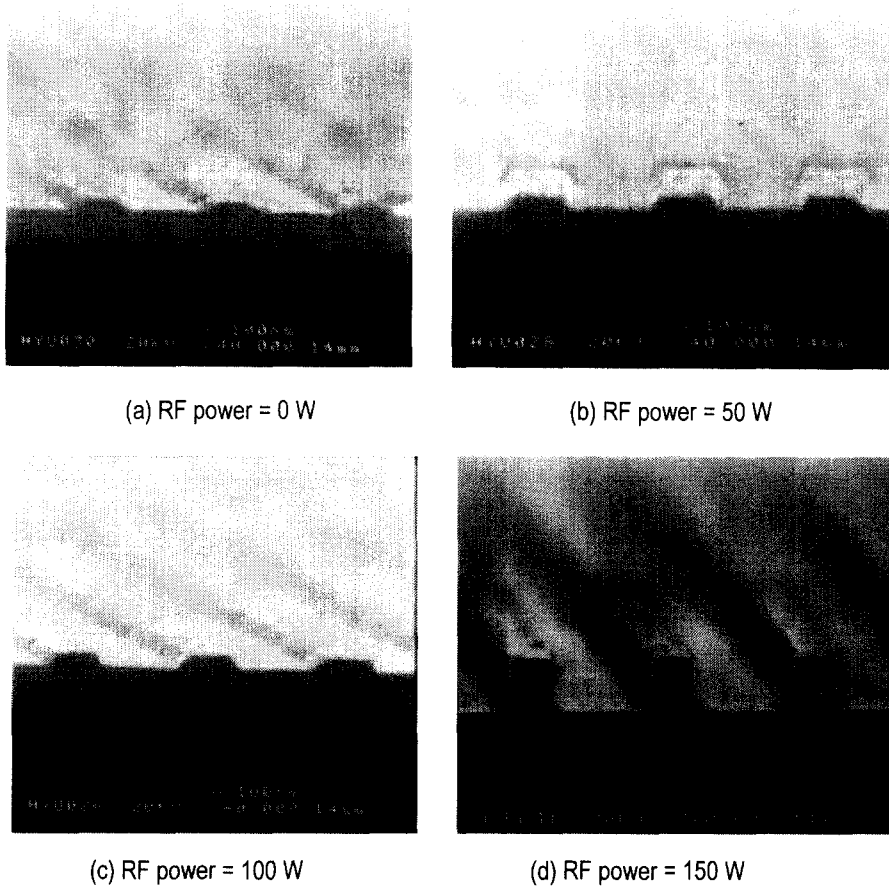


Fig. 3. Etching profile of Ta with various RF power : (a) RF power=0W (b) RF power=50W (c) RF power=100W (d) RF power=150W

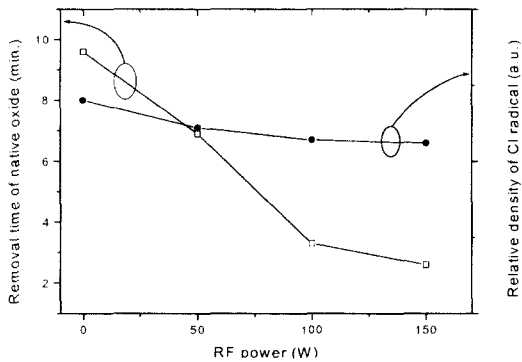


Fig. 4. Removal time of Ta native oxide and relative density of Cl radical at various RF power.

mean free path가 짧아지게 되며, 이러한 scattering에 의해 energy 손실이 심해져 Ta 박막 상의 oxide를 식각하는데 충분한 energy를 공급하지 못하게 되고, 이는 물리적 식각에 장애 요인으로 작용한 것으로 판단된다. 그리고 그림 6을 통해 알 수 있듯이, 압력 변화에 따라 Cl radical 양은 공정압력에 비례하여 증가하며, 이 선형성은 일반적인 laser-induced fluorescence (LIF) 분석을 통해 알려진 Cl radical의 밀도변화 결과⁸⁾와 일치한다.

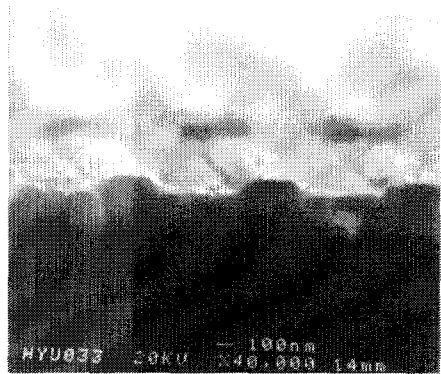
Ar 함량 변화에 따른 효과

그림 7은 식각 gas에 변화를 주어 Cl₂에 Ar을 혼합하였

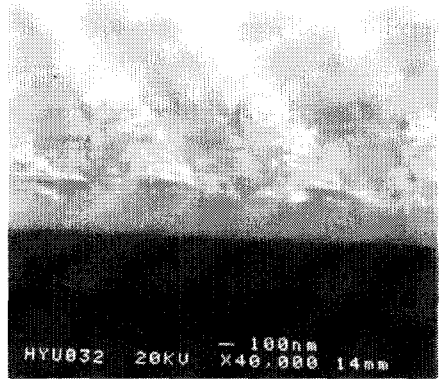
을 때의 효과를 관찰하기 위하여 hard mask 재료인 SiO₂와 Ta의 etch rate를 비교하였다. 이 경우에는 inert gas인 Ar이 혼합되었을 때 Ar gas의 함량에 따라 Ta의 etch rate는 Ar 첨가시 증가하나 5% 이상에서는 포화되는 경향을 볼 수 있었고, SiO₂의 etch rate는 거의 선형적으로 증가함을 통해 Ar 함량에 비례해서 물리적 sputtering이 활성화됨을 관찰할 수 있었다. 그러나 미량의 산소라도 Ta와 결합하면 식각을 방해한다는 현상¹¹⁾에 의해 실제 공정시 Ta의 etch rate는 그림 7보다 낮은 값을 갖게 될 것으로 사료되며, 이는 그림 8을 통해서도 예측할 수 있다. 물리적 sputtering에 의해 결정되는 native oxide 제거시간을 측정한 결과인 그림 8의 경우 그림 7의 결과로부터 예측한다면 Ar flow의 증가에 따라 제거시간이 선형적으로 감소해야 하나, 순수 Cl₂의 경우만 removal time이 가장 길고 물리적 sputtering 효과를 높일 수 있는 Ar을 포함했을 경우에는 그 양에 무관한 결과를 보여 주고 있다. 이는 Ar sputtering에 의해 SiO₂로부터 분리된 산소에 의한 Ta 막의 passivation 강화에서 비롯됐다고 볼 수 있다. 더불어 그림 9에서 볼 수 있듯이 Ar gas를 식각 gas에 포함시키면 물리적 sputtering에 의해 생성되는 산소에 의한 Ta의 passivation 현상과 박막 구조상 약한 결합력을 갖는 edge 부분이 먼저 식각 되어 나가는 taper 현상을 심각하게 유발시키게 되어 패턴 상부의 폭이 좁아지고 하부의 폭



(a) 3mTorr



(b) 8mTorr



(c) 15mTorr

Fig. 5. Etching profile of Ta at various process pressure: (a) 3mTorr, (b) 8mTorr, (c) 15mTorr.

은 넓어져 전체적으로 slope가 완만해지는 결과를 초래할 수 있다. 따라서 SiO₂를 hard mask로 이용한 Ta 식각 시에는 오히려 Ar이 첨가되지 않은 순수 Cl₂가 식각 가스로 적합하다는 결론을 유출할 수 있다. 위 실험을 통해 물리적 식각이 과도하게 진행될 때의 현상을 고찰할 수 있었으며, Ta 박막의 식각시에는 profile 구현을 위하여 화학적인 식각기구의 유지가 필요함을 알 수 있었다.

Microloading effect

위에서 얻어진 Ta 박막의 식각 최적조건을 사용하여 그림 10(a)와 같은 0.25 μ m 패턴을 형성하였으나 같은 식각 조건에서 패턴의 폭을 0.2 μ m로 감소시켰을 때는 그림 10

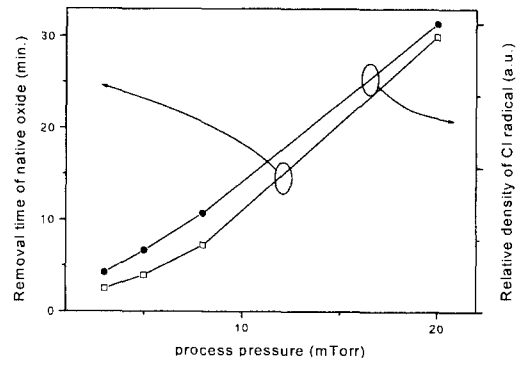


Fig. 6. Removal time of Ta native oxide and relative density of Cl radical at various process pressure.

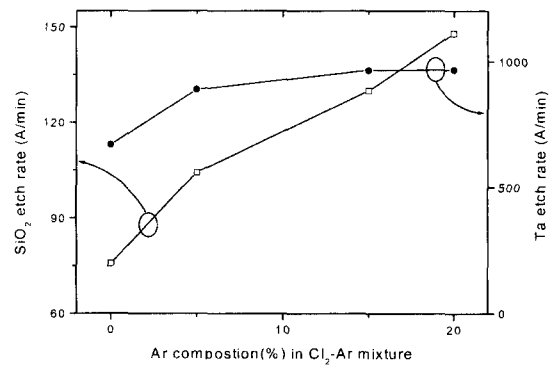


Fig. 7. Etch rate of Ta and SiO₂ at various gas chemistry, measured separately. But in actual patterning process, these two materials are etched concurrently and different etch rates resulted.

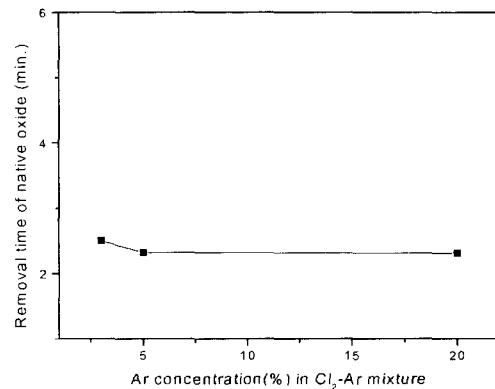
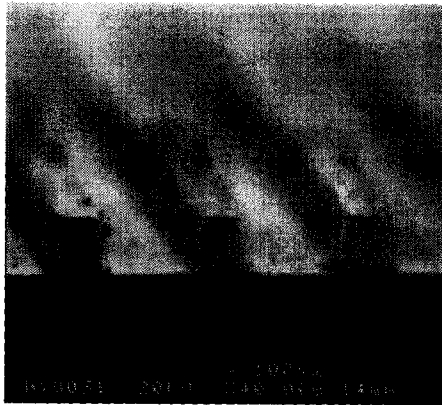


Fig. 8. Removal time of Ta native oxide at various gas chemistry.

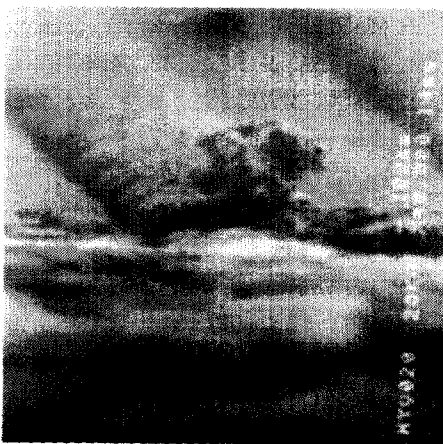
(b)와 같은 microloading 현상이 발견되었다. 이러한 microloading 현상은 패턴 폭의 감소와 밀도의 증가에 의해 plasma 입자들의 진행을 가로막는 geometrical shadowing이 지배적이 되면서 radical이 bottom trench에 도달할 수 있는 확률이 감소되어, ion에 의한 물리적 식각이 지배적이 되고¹²⁾ 반응생성물의 배출이 어렵게 되어 이에 따른 passivation의 활성화로 식각이 방해받기 때문이라고 알려져 있다.¹³⁾ 이러한 microloading 현상을 극복하기 위하여 본 실험에서는 double step 식각공정을 도입하여 단계별로 microwave power를 바꾸어 가며 식각을 수행하였



(a) Ar concentration = 0 %



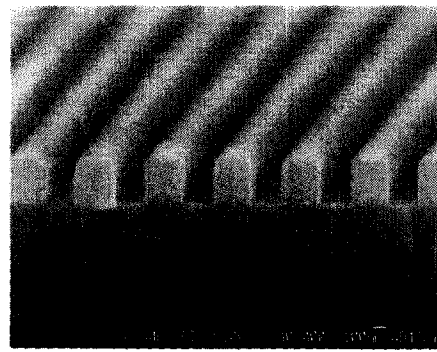
(b) Ar concentration = 5 %



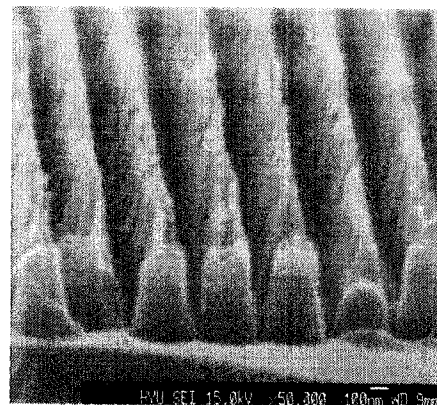
(c) Ar concentration = 20 %

Fig. 9. Etchin gprofile of Ta with various gas chemistry(Cl_2 +Ar).

다. 이는 Ta 박막 식각시 초기 산화막 제거를 위해서는 물리적인 식각이 주요 인자로 작용하고, 실제 Ta 박막의 식각시에는 화학적 식각이 주요 인자로 작용하게 된다는 기본적인 식각 원리를 이용하여 최적의 식각 profile을 구현해 내기 위함이다. 첫 단계 식각에서는 물리적 식각이 지배적이 되도록 하여 Ta 박막 표면상의 oxide 제거 및 식각 초



(a) 0.25 μ m



(b) 0.2 μ m

Fig. 10. Etchin gprofile of Ta : (a) 0.25 μ m L&S, (b) 0.2 μ m L&S showing microloading effect.

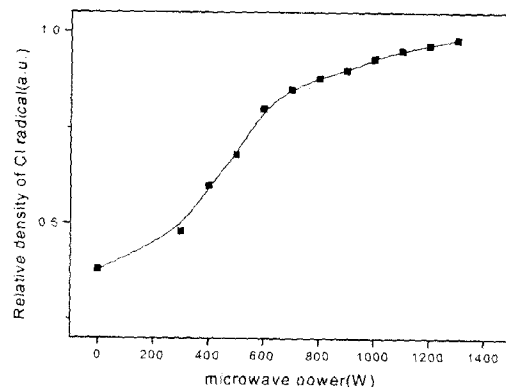
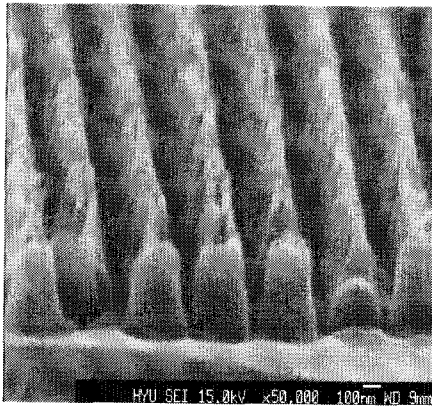
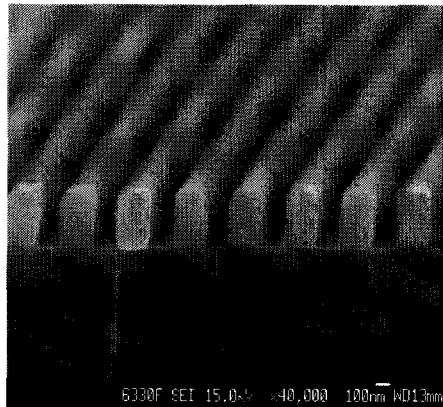


Fig. 11. Relative density of Cl radical density as a function of microwave power.

기조건을 마련하기 위해 RF power를 150W로 진행하였다. 그리고 공정을 멈춘 상태에서 진공을 5분간 유지시켜 반응생성물의 배출을 유도하였고, 두 번째 식각은 Ta 박막의 profile 개선을 위해 화학적 식각이 지배적이 되도록 microwave power를 900W에서 1200W로 증가시켜 보다 많은 양의 radical 형성을 유도하였고^{14,15)}, 이는 Ar actinometry를 이용한 그림 11의 결과를 통하여 확인할 수 있다. Microwave power의 증가에 의해 생성된 다량의 Cl



a) continuous etching



b) double step etching

Fig. 12. Comparison of etch profile of $0.2\mu\text{m}$ Ta L&S patterns.

radical은 패턴 입구뿐만 아니라 바닥까지 충분한 화학반응을 일으켜 저휘발성의 Ta chloride막을 형성하였는데, 방향성을 갖는 이온의 충돌에 의해 바닥부분의 Ta chloride는 휘발성 물질로의 분해가 일어나는 연속적인 식각이 활성화 되었다고^{6,13)} 볼 수 있다. 이에 비해 측벽에 생긴 Ta chloride막은 식각에 대한 보호막으로 작용하여 pattern의 왜곡을 막아줌으로써 microloading effect를 개선한 그림 12(b)의 $0.2\mu\text{m}$ L&S 패턴을 정확히 구현할 수 있었다.

4. 결 론

Electron Cyclotron Resonance (ECR) etching system을 이용한 $0.25\mu\text{m}$ 이상의 Ta 박막의 식각은 RF power 150 W, microwave power 900W, 공정 압력 3 mTorr, Ar을 첨가하지 않은 순수한 Cl_2 의 경우에서 최적의 식각 profile을 얻었다. 그러나 $0.2\mu\text{m}$ 이하의 미세한 패턴으로 식각을 진행할 경우 높아진 aspect ratio와 패턴의

고집적화로 인해 microloading 현상이 발생하였는데, 이를 해결하기 위해 double step 식각을 수행하였다. 첫 단계 식각에서는 물리적 식각이 지배적이 되도록 하였고, 두 번째 식각에서는 화학적 식각이 지배적이 되도록 microwave power를 증가시켰으며, 그 두단계 사이에 반응식각물 배출을 위한 5분간의 진공 유지를 통해 microloading effect를 극복한 우수한 식각 profile을 얻을 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2000년 한양대학교 교내 연구비 지원으로 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Y. Iba, F. Kumasaka, I. Aoyama, T. Taguchi and M. Yamabe, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**, 6463 (1996).
2. R.A. Gottscho, C.W. Jurgensen and D.J. Vitkavage, *J. Vac. Sci. Technol.*, B **10**(5), 2133 (1992).
3. N. Fujiwara, H. Sawai, M. Yoneda, K. Nishioka and H. Abe, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29**, 2223 (1990).
4. E.S.G. Shapfeh and C.W. Jurgensen, *J. Appl. Phys.*, **66**, 4664 (1989).
5. T. Maruyama, N. Fujiwara and M. Yoneda, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 2170 (1994).
6. M. Yamada, M. Nakaishi and K. Sugishima, *J. Electrochem. Soc.*, **138**(2), 496 (1991).
7. K. Kim, S. Lee, C. Park and J. Ahn, *J. Kor. Phys. Soc.*, (to be published).
8. K. Ono, M. Tuda, K. Nishikawa, T. Oomoni and K. Namba, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 4424 (1994).
9. N.N. Efremow, M.W. Geis, R.W. Mountain, G.A. Lincoln, J.N. Randall and N.P. Economou, *J. Vac. Sci. Technol.*, B **4**(1), 337 (1986).
10. R. Hsiao and D. Miller, *J. Electrochem. Soc.*, **143**(10), 3266 (1996).
11. M. Oda, A. Ozawa and H. Yoshihara, *J. Vac. Sci. Technol.*, B **11**, 37 (1993).
12. R.J. Xie, J.D. Kava and M. Siegel, *J. Vac. Sci. Technol.*, A **14**(3), 1067 (1996).
13. M. Nakaishi and K. Sugishima, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30**(11B), 3065 (1991).
14. S. Samukawa and H. Ohtake, *J. Vac. Sci. Technol.*, A **14**(6), 3049 (1996).
15. J. Asmussen, T.A. Grotjohn, P. Mak and M.A. Perrin, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **25**(6), 1196 (1997).