

SF₆ 플라즈마를 이용한 텅스텐 박막의 반응성 이온식각에 관한 실험적 연구

(Experimental Study of Reactive Ion Etching of Tungsten Films Using SF₆ Plasma)

朴商奎*, 徐聖佑**, 李時雨*

(Sang Kyu Park, Seong Woo Seo and Shi Woo Rhee)

要約

SF₆ 플라즈마를 이용하여 텅스텐 박막을 반응성 이온 식각하였으며 조업조건이 식각율, 균일도, 이방성 및 선택도에 미치는 영향을 분석하였다. 식각율은 전력이 커질수록 증가하였으며 200mtorr의 압력에서 최대식각율을 얻었다. 전극간격이 커질수록 200mtorr 이하의 압력에서는 식각율이 증가하였지만 200mtorr보다 큰 압력에서는 식각율은 감소하였다. 20 sccm의 유량에서 최대식각율을 얻었으며 기판의 온도가 증가할수록 식각율은 증가하였고 activation energy는 0.046 eV이었다. 산소는 20% 첨가할 경우에 식각율이 최대가 되었으며 아르곤은 20%까지 첨가할 경우 약간 증가하였고 질소는 첨가할수록 감소하였다. 저압으로 갈수록 균일도는 향상되었으며 100mtorr 이하에서는 4%미만의 균일도를 얻었다. 질량분석기를 이용하여 기체의 조성을 분석하였으며 XPS 분석을 통하여 전력이 증가할수록 황이나 불소에 의해서 표면이 오염됨을 관측하였다. 이방성은 압력과 기판 온도가 낮을수록, 전력과 전극간격이 작을수록 향상되었다. CH₄를 첨가한 경우 향상되었으며 약 10%정도의 산소를 첨가한 경우에 이방적인 식각 패턴을 얻었다. 선택도는 전력이 작고 온도가 낮을수록 압력과 전극간격이 커질수록 높아졌다. 특히 이방성과 선택도를 향상시킬 수 있는 좋은 방법으로 저온식각공정을 제시하였다.

Abstract

Experiments on RIE of tungsten films using SF₆ plasma were conducted to investigate the effect of process parameters on etch rate, uniformity, anisotropy, and selectivity. As power increased, the etch rate increased. Maximum etch rate was obtained at 200mtorr. As interelectrode spacing increased, the etch rate increased for $P < 200\text{mtorr}$ while it decreased for $P > 200\text{mtorr}$. Etch rate was maximum at 20 sccm gas flow rate. As substrate temperature increased, the etch rate increased and activation energy was 0.046 eV. In addition, maximum etch rate was acquired at 20 % O₂ addition. The etch rate slightly increased when Ar was added up to 20% while it continuously decreased when N₂ was added. Uniformity got improved as pressure decreased and was less than 4% for $P < 100\text{mtorr}$. Mass spectrometer was utilized to analyze gas composition and S and F peaks were observed from XPS analysis with increasing power. The anisotropy was better for smaller power and spacing, and lower pressure and temperature. It improved when CH₄ was added and anisotropic etch profile was obtained when about 10% O₂ was added. The selectivity was better for smaller power larger pressure and spacing, and lower temperature. Especially, low temperature processing was proposed as a novel method to improve the anisotropy and selectivity.

*正會員, 浦項工科大学 化學工學科 材料工程研究室
(Dept. of Chemical Eng., Pohang Institute
of Science and Technology)

**準會員, 味元商社(株) 技術研究室
(Laboratory for Advanced Materials Processing)
接受日字: 1992年 8月 10日

I. 서론

고집적회로 제조기술의 급속한 발전으로 현재 16 MDRAM이 양산단계에 있고 256 MDRAM개발을 위해 선진각국이 치열하게 경쟁을 벌이고 있다. 그러나 1 MDRAM 이상에서는 선폭이 1 마이크로 미만 이 되고 수평방향의 선폭감소에 비해 수직방향의 선폭은 감소하기 힘들기 때문에 표면의 굴곡도가 복잡해지고 3차원적 다층막 구조를 이루게 된다. 이러한 복잡하고 굴곡이 심한 구조를 소자의 설계대로 가공하려면 특히 반응속도, 이방성 (anisotropy), 선택도 (selectivity) 가 높은 식각공정기술이 필요하다.^[1] 이러한 요건을 충족시키는 방법으로 저온, 비평형 플라즈마를 이용한 건식식각공정이 널리 활용되고 있다. 그러나 건식식각공정은 중성자, 전자, 양/음이온, 광자등 여러 종류의 입자들의 존재, 비평형, 전기장의 형성, 기상과 표면에서의 복잡한 물리, 화학적 현상, 수많은 공정변수들과 이들 변수들의 복잡한 상호 연관관계로 인하여 해석하기가 매우 힘들다. 따라서 플라즈마를 이용한 미세박막 패터닝의 건식식각공정에 대한 근본적인 연구가 시급히 요구되고 있는 실정이며 이를 위하여 in-situ 진단장비를 이용하여 플라즈마의 특성에 관해서 분석하고 반응기의 조업조건이 식각율, 이방성, 선택도에 미치는 영향을 정확히 조사하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 텅스텐 박막을 대상으로 반응성 이온식각 (Reactive Ion Etching : RIE) 실험을 수행하였다. 최근에 고속, 고밀도의 VLSI 공정의 금속화 소재로서 난용성 (refractory) 금속 (W, Mo, Ta) 과 이들의 실리사이드가 interconnect나 게이트 전극에 널리 응용되고 있다.^[2,3] 기존의 금속박막으로는 sputtering으로 증착된 알루미늄이 많이 사용되었으나 여러가지 단점이 노출되어 이를 대체할 수 있는 화학증착법에 의한 금속박막 제조공정이 관심을 끌게 되었다. 이러한 공정에서 특히 관심을 끄는 것이 텅스텐으로서 낮은 저항과 높은 용융점을 가지고 있으며 충당힘이 우수하여 현재 interconnect로 쓰이는 알루미늄이나 게이트 전극으로 쓰이는 다결정 실리콘을 대체 또는 보완하고 있다.^[2,3] 이들 금속박막은 주로 불소기체를 포함한 기체 즉 SF₆^[5,12] 나 CF₄^[5,9,13] 를 사용하여 식각시키는데 주로 높은 식각율을 갖고 오염물 생성이 적은 SF₆기체가 널리 이용되는 추세이다. 또한 SF₆나 CF₄기체에 O₂^[5,6,8,10], N₂^[7,9,15], Ar^[9] 을 첨가시켜 실험한 결과가 있으며 F기를 갖는 기체보다는 증기압이 낮은 생성물을 만들어 낮은 식각율을 주는 Cl기가 포함된 Cl₂^[16] 나 BCl₃

^[17] 기체 플라즈마를 이용한 연구도 진행되어 왔다. 높은 식각율을 유지하며 이방성이나 선택도를 향상시키기 위해 F성분과 더불어 Cl기나 Br기가 섞인 즉 CF₂Cl₂, CF₃Cl, C₂F₅Cl, CF₃Br 등을 쓰기도 하며 이들 hydrogenated 기체나 혹은 chlorinated기체들을 CF₄/O₂ 혹은 SF₆/O₂ 와 함께 섞어 실험한 연구도 있다.^[18,22] 도랑의 벽면에 fluorocarbon 라디칼의 polymerization을 촉진시켜 이방성을 향상시키기 위해 CHF₃^[6,12] 를 쓰기도 한다.

본 연구에서는 SF₆를 이용하여 전력, 압력, 전극간 거리, 유량등의 공정변수가 텅스텐 박막의 식각율, 균일도, 이방성, 선택도 등 전반적인 식각특성에 미치는 영향을 종합적으로 살펴보고 O₂, Ar, N₂ 등 여러 종류의 첨가기체가 식각율 혹은 이방성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 질량분석기 (Quadrupole Mass Spectrometer)를 이용하여 식각반응 메커니즘을 규명하고자 하였으며 실제 공정에서 유용하게 쓰일 수 있는 종말점 탐지 (end point detection)를 하였다. 본 연구의 궁극적인 목적은 반응성 이온 식각공정에 대한 근본적인 이해를 도모하고 텅스텐 식각공정의 최적화 및 새로운 식각공정기술 개발에 기여하는 것이다.

II. 실험

1. 실험장비

본 실험에서 사용한 RIE 장비는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 단일 웨이퍼 처리용 평행판 플라즈마 반응기이다. 반응기 윗 전극은 직경이 20cm이고 접지되어 있으며 showerhead를 통하여 반응기체가 균일하게 유입된다. 아랫전극은 직경이 14cm이며 두 전극 사이의 간격은 3 ~ 5cm 범위에서 조절할 수 있도록 설계하였다. 아랫전극으로는 13.56 MHz의 주파수를 갖는 고주파 발전기 (ENI OEM-12)에 matching network (ENI MW-10)를 연결하여 전력을 공급하였으며 또한 0 ~ 100°C 사이에서 온도를 조절할 수 있는 냉각수 순환기 (Cole Parmer L-01270-50)를 이용하여 기판을 일정온도로 유지하였다. 진공 시스템으로는 rotary vane pump (Leybold D40BCS/DS)와 4인치 확산펌프 (한국진공사)를 2stage로 연결하여 사용하였으며 확산펌프로부터의 오일 역류를 방지하기 위해 반응기와 펌프사이에 액체질소 trap을 설치하였다. 반응기 압력과 유량은 독립적으로 조절이 가능하도록 하였는데 유량은 질량유속제어기 (MKS 247C)에 의해 조절되었으며 convector압력계 (Granville Phillips Co. 275)를 이

용하여 압력측정을 하였으며 일정한 반응기 압력을 유지하기 위하여 수동으로 조작되는 throttle valve 와 needle valve를 사용하였다.

잔류기체 (residual gas)의 조성분석과 종말점을 구하기 위해 반응기 측면에 Quadrupole Mass Spectrometer (VG Sensorlab 300D QMS)을 부착하였다. 실험에 사용한 기체로는 주반응 기체로 SF₆ (99.999%)를 사용하였고 첨가기체로는 O₂ (99.999%), Ar (99.999%), N₂ (99.9999%)와 CH₄ (99.9%)를 이용하였으며 purge용으로는 N₂ (99.999%) 기체를 사용하였다.

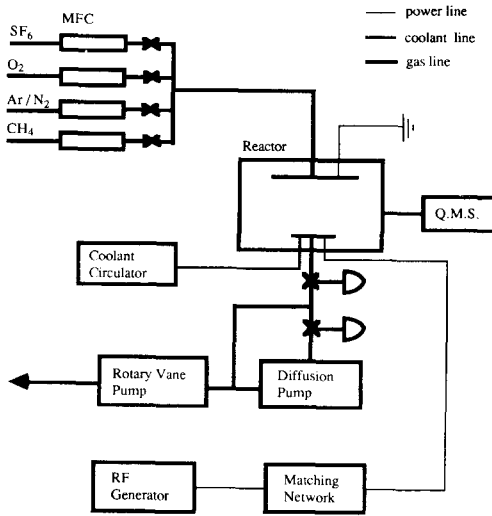


그림 1. 반응성 이온 식각 반응기의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of reactive ion etching system.

2. 실험방법

본 실험에 사용한 웨이퍼는 boron이 도핑된 p형 실리콘이며 텅스텐 박막은 금성 일렉트론사에서 저압 화학증착공정에 의하여 증착된 것으로서 Table 1에 증착순서를 요약하여 나타내었다.

표 1. 식각 실험에 사용된 텅스텐 박막의 저압 화학 증착 공정

Table 1. LPCVD process of tungsten thin film used in etching experiment.

Process	Time	Process Conditions
Nucleation	20 secs	475°C, 0.4 torr, 5 sccm WF ₆ 5 sccm SiH ₄ 2800 sccm Ar
Deposition	120secs	475°C, 80 torr, 75 sccm, WF ₆ 500sccm H ₂ , 300 sccm, N ₂ 2200 sccm Ar

본 실험은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 첫째로는, 마스크(mask)가 없는 텅스텐 박막시편에 대하여 각 조업조건을 변화하며 식각율을 측정하는 실험과 둘째로는, 감광성 고분자(photoresist) 물질을 텅스텐 박막위에 마스크로 입힌 시편을 식각한 후 이방성을 측정하는 실험이다. 실험에 사용된 blanket과 패턴된 웨이퍼 시료는 Fig. 2와 같으며 각각 1x1 cm², 1x2 cm²의 크기로 잘라서 사용하였다. blanket 웨이퍼의 식각율은 실험전후의 시편의 질량차이를 정밀저울 (microbalance)을 사용하여 측정한 후 이로부터 환산하였다. 시료웨이퍼가 놓이는 아랫전극의 위치에 따른 균일성 조사를 위한 실험에는 크기가 같은 3개의 웨이퍼 시편을 아랫전극 중심에서 반경 방향으로 0 cm, 3 cm, 6 cm에 시편의 중심을 위치시켜 실험하여 식각율을 비교하였다.

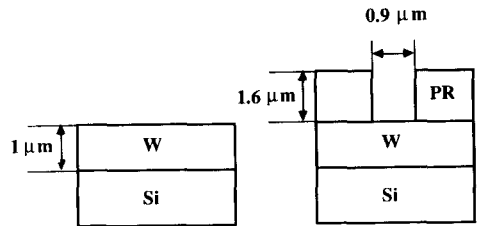


그림 2. (a) 마스크가 없는 시편과 (b) 마스크가 있는 시편의 단면 예시도

Fig. 2. Illustrative cross-sectional view of (a) blanket and (b) patterned wafer sample.

Patterned 웨이퍼 시료를 이용한 이방성과 선택도는 실험 후 SEM의 단면 사진으로부터 측정하였다. 본 연구에서 이방성은 다음과 같이 정의하였다.

$$An+1 - \frac{R_L}{R_V}, \quad 0 \leq An \leq 1 \quad (1)$$

여기서 R_L과 W는 각각 mask 밑으로 파이는 undercut, 즉 수평방향의 식각율과 식각길이이고 R_V와 H는 각각 수직방향의 식각율과 식각깊이다. 기상에서 생성된 반응성 라디칼은 확산에 의해서 등 방향으로 움직이지만 양이온은 전극근처에 형성되는 sheath 영역의 강한 전기장에 의하여 가속되어 수직 방향으로 직선운동을 하게 된다. 따라서 sheath 영역에서의 양이온의 분산 (scattering) 효과를 무시한다면 R_L은 화학적 식각율 (chemical etching rate)로서 반응성 라디칼의 농도와 화학식각속도상수의 합

수이며 R_v 는 총식각율로서 반응성 라디칼의 농도, 웨이퍼 표면에 도달하는 양이온의 농도와 에너지, 이온보조식각속도상수의 함수라 할 수 있다. 선택도는 서로 다른 종류의 박막을 사용할 경우 매우 중요한 요소로서 본 연구에서는 텅스텐과 photoresist의 식각율의 비로서 정의하였다.

본 실험에서는 중요한 식각공정변수 즉 압력, 전력, 전극간 거리, 유량과 첨가기체의 영향을 분석하였는데 Table 2와 같은 범위에서 실험하였다. 플라즈마에는 여러 입자들이 혼재하여 서로 영향을 주고 있고 한 조업변수를 변화시켰을 경우 여러가지 내부 변수 (internal variable)들이 복잡하게 변화하기 때문에 Table 2와 같이 기본 실험조건을 정하고 한 변수씩만 변화시키며 실험하였다. 따라서 이후에 특별히 서술하지 않을 경우에는 기본 조건에서 수행한 실험이다.

표 2. 반응성 이온 식각 실험에서 조사한 공정 변수의 기본값과 범위

Table 2. Basic values and range of operating parameters examined in RIE experiments.

Parameter	Basic value	Range Examined
Power	50 watts	25 ~ 200 watts
Gas pressure	200 mtorr	20 ~ 400 mtorr
Inlet gas flow rate	20 sccm	10 ~ 50 sccm
Interelectrode spacing	4 cm	3 ~ 5cm
Substrate Temperature	20 ℃	0 ~ 70℃
Gas	SF ₆	SF ₆ /Ar, SF ₆ /N ₂ , SF ₆ /O ₂ , SF ₆ /CH ₄

III. 결과 및 고찰

1. 식각율과 균일도 실험

Fig. 3은 입력전력이 식각율에 미치는 영향에 대한 그림으로서 입력 전력이 증가함에 따라 self-DC-bias와 식각율이 증가하였다. 입력 전력이 증가하면 플라즈마내의 전자가 더 많은 에너지를 얻게 되며 이에 따른 전자충돌반응 (electron-impact reaction) 즉 여기(excitation), 이온화 (ionization)과 해리(dissociation) 반응들이 촉진되어 전자와 이온농도가 증가하고 이에 따른 반응성 라디칼인 F (fluorine) 원자의 농도가 증가하여 화학적 식각율이 증가하게 된다. 또한 전력이 증가할수록 이온의 농도

가 증가하는 것과 더불어 sheath에서의 전기장의 세기 즉 self-DC-bias가 증가하므로 이온의 표면충돌 에너지가 증가하여 이온보조식각율이 증가하게 된다. 따라서 총 식각율은 증가하나 주의해서 인식해야 할 사항은 전력이 증가함에 따라 식각율이 비례해서 증가하는 것이 아니라 식각율의 증가율이 점차로 감소한다는 사실이다.

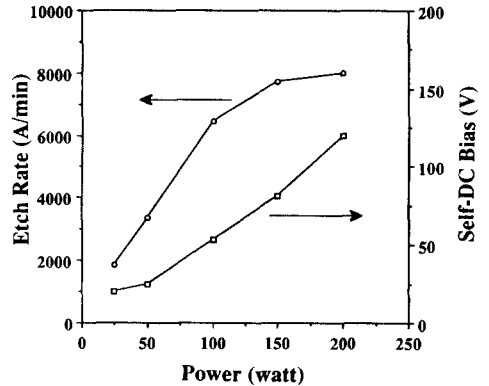


그림 3. 입력 전력이 식각율과 self-DC-bias에 미치는 영향

Fig. 3. Effect of power on etch rate and self-DC-bias.

Fig. 4는 전극간 거리를 변수로 하여 압력에 따른 식각율의 변화를 살펴본 것이다. 압력과 전극간 거리의 영향은 플라즈마 조업변수 중 가장 분석하기 힘든 변수들로서 이들이 변함에 따라 플라즈마의 여러 내부 변수들이 동시에 변화하여 복잡하게 나타나기 때문이다. 우선 모든 전극간 거리에 대하여 200 mtorr에서 식각율이 최대가 되었으며 self-DC-bias는 압력이 낮아짐에 따라 증가하였다. 대부분의 self-DC-bias는 윗전극과 아랫전극의 크기가 다른 반응기에서 작은 전극쪽의 sheath에 형성된다. 압력이 감소함에 따라 self-DC-bias가 증가하는 이유는 전자와 중성자와의 충돌빈도수의 감소 즉, 전자의 평균자유행로 (mean free path)가 증가함에 따라 에너지 소모가 줄어들어 전자 에너지가 증가하기 때문이라 생각된다. 그러나 100 mtorr 이하의 영역에서는 압력이 감소함에 따라 식각율이 계속하여 감소하는데 이는 전자 에너지의 증가 효과보다 주원료 기체의 농도 감소에 따른 반응성 라디칼의 농도 감소 효과가 훨씬 크기 때문이라 생각된다. 이를 수식으로 표현하여 살펴보면 반응성 라디칼 F의 생성율은

$$r_d = k_{d0} \exp\left(-\frac{E_d}{kT_e}\right) n_e N \quad (2)$$

과 같이 표현할 수 있는데 k_{d0} 는 pre-exponential factor, E_d 는 SF₆의 기체 해리 활성화 에너지, n_e 와 T_e 는 각각 전자의 밀도와 온도, k 는 Boltzmann 상수이며 N 은 주원료기체인 SF₆ 밀도를 의미한다. 압력이 감소함에 따라 전자온도 T_e 는 약간 증가하지만 전자밀도 n_e 와 SF₆ 밀도 N 이 감소하여 화학적 식각율이 감소하게 된다. 또한 압력의 감소로 인한 평균 체류시간 (mean residence time) 감소 역시 F 라디칼의 생성을 낮게 하여 식각율을 감소시킨다. 따라서 압력이 낮아짐에 따라 이온보조식각율은 증가하지만 화학적 식각율은 더 많이 감소하여 총식각율이 감소한다고 생각된다. 이러한 결과를 종합해보면 100 mtorr 미만의 압력에서는 이온에 의한 식각이 중요한 반응 메커니즘이라 하겠다. 100 ~ 300 mtorr 영역에서는 반응성 라디칼의 생성이 증가되어 화학적 식각율은 증가한다. 그러나 상대적으로 압력이 증가함에 따라 sheath 영역에서의 이온이 중성자들과 충돌하는 빈도수가 증가하므로 이온의 에너지가 감소되어 이온의 가속 현상은 감소하게 되지만 여전히 수십 정도의 self-DC-bias 측정되고 있어 어느 정도는 이온에 의한 식각이 이루어지고 있음을 볼 수가 있다. 200 mtorr의 압력에서 가장 높은 식각율을 보이는 이유는 반응성 라디칼의 농도도 높고 또한 이온도 어느 정도의 에너지를 갖고 기판을 때려주는 효과가 동시에 일어나기 때문이라 생각되는데 이는 공동작용효과 (synergistic effect) [23-24] 라고 할 수 있겠다. 300 mtorr 이상의 압력에서는 총식각율과 self-DC-bias 모두가 크게 감소하는 것으로 관찰되었다. 즉 이온이 sheath 영역에서 가속될만한 bias가 존재하지 않는 것으로 보이며 따라서 이 압력범위에서는 이온보조식각율은 급격히 줄어들어 주로 F 라디칼에 의한 화학적 식각이 주요반응메커니즘이라 하겠다. SF₆ 기체의 밀도가 증가하는데도 불구하고 총식각율이 감소하는 이유는 전자와 중성자의 충돌빈도수가 증가하여 전자에너지의 감소가 더 우세하게 작용하기 때문이다.

압력과 마찬가지로 전극간 거리의 영향 또한 매우 분석하기 복잡한 공정변수로 알려져 왔다. 본 연구에서는 전극간 거리 영향을 분석하기 위하여 여러 압력에서 전극간 거리를 3cm ~ 5cm 범위에서 변화시키며 실험하였다. Fig. 4에서 보는 바와같이 200 mtorr 이하의 압력에서는 전극간 거리가 작아질수록 식각율은 감소하였고 그 이상의 압력에서는 식각율이 증가

하였다. 전극간 거리가 작아질수록 self-DC-bias는 증가하는 것으로 관찰되었다. 전극간 거리가 작아지면 동일한 입력전력에 대하여 플라즈마의 부피가 감소하기 때문에 전자의 에너지 및 밀도가 증가하고 이에 따라 라디칼의 농도가 증가함으로써 화학적 식각율이 증가할 것이라 예상된다. 하지만 여기서 명심해야 할 사항은 전극간 거리가 작아질수록 SF₆ 기체의 체류시간이 짧아져 F 라디칼이 생성될 시간이 줄어들며 또한 전자가 전극 표면과 충돌하여 재결합함으로써 전자 밀도가 감소할 가능성이 높아진다. [25] 따라서 전극간 거리가 작아질수록 이온보조식각율은 증가하지만 전극간 거리가 체류시간과 플라즈마의 밀도 및 에너지에 주는 영향중 어느 것이 더 우세한가에 따라 총식각율이 증가할 수도 혹은 감소할 수도 있다. 본 실험에서는 200 mtorr 이하에서는 특히 기체 유입속도가 빨라져 전극간 거리의 감소에 따른 체류시간의 감소효과가 우세하고 200 mtorr보다 큰 압력에서는 전자의 에너지 및 밀도의 증가효과가 우세하기 때문에 위와 같은 결과가 얻어졌다고 생각된다.

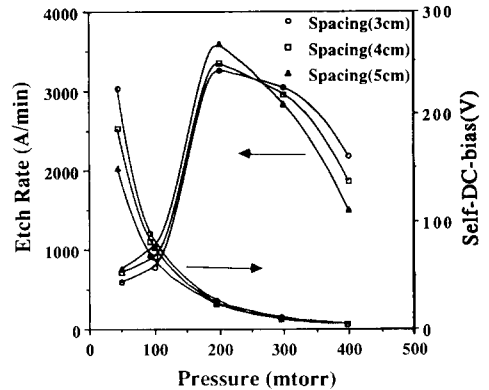


그림 4. 여러 전극간 거리에 대하여 압력이 식각율에 미치는 영향

Fig. 4. Effect of pressure on etch rate for various interelectrode spacings.

Fig. 5에서는 여러 압력범위에서 SF₆ 기체의 유량이 식각율에 미치는 영향에 대해서 나타내었다. 우선 기본조건인 200 mtorr 에서는 20 sccm의 유량에서 가장 높은 식각율을 보였다. 유량이 너무 낮으면 공급되는 반응기체의 절대량이 부족하여 식각율이 감소하고 (Supply-Rate-Limited Regime) 높은 유량에서는 체류시간이 감소하여 F 라디칼의 해리율이 감소하거나 이미 생성된 라디칼이 표면과 충분한 반응

시간을 갖지 못하기 때문에 식각율이 감소한다고 (Pumping-Rate-Limited Regime) 생각된다.^[26, 27] 최고 식각율을 보이는 유량은 반응기의 크기, 사용되는 플라즈마 기체, 여러 반응조건에 따라 변하며 이러한 사실들은 다른 연구가의 실험 결과^[27] 와 전산모사 결과^[28] 에서 밝혀진 바 있다. 50 mtorr에서는 유량이 증가함에 따라 식각율이 계속 감소하였는데 속도가 200 mtorr일 때에 비해 네배가 증가하여 훨씬 낮은 유량에서 최대 식각율이 얻어지리라 예상되지만 본 실험에 사용된 질량유속기는 낮은 유량에서 정확도가 떨어져 이를 확인할 수 없었다. 400 mtorr에서는 전자에너지 및 밀도가 감소하고 electronegative 한 SF₆ 기체의 특성 때문에 유량이 증가함에 따라 식각율은 계속 감소하였다.

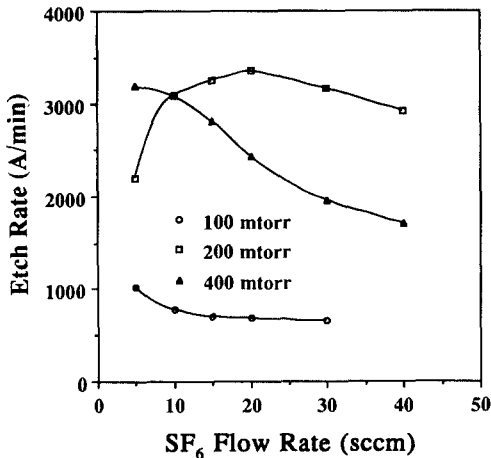


그림 5. 다양한 압력하에서 유량이 식각율에 미치는 영향

Fig. 5. Effect of flow rate on etch rate for various pressures.

Fig. 6는 기판지대인 아랫전극의 온도를 2℃에서 70℃까지 변화시켜 가며 식각율을 측정된 결과로서 온도가 증가할수록 총식각율이 증가하였는데 이는 온도의 상승으로 인하여 주로 화학적 식각율이 증가하였기 때문이라 생각된다. 총식각율과 온도를 Arrhenius plot하여 계산된 effective activation energy는 0.046 eV이었다.

Fig. 7는 혼합기체의 총유량을 20 sccm으로 정하고 산소 (O₂) 첨가에 따른 식각율의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 나타난 바와같이 20%의 산소첨가에서 식각율이 최대가 되었다. 산소첨가 영향을 좀

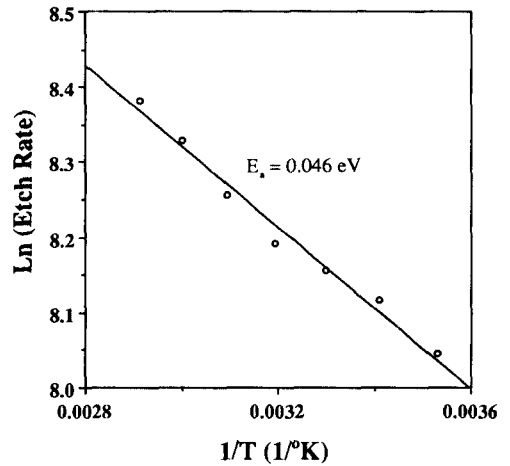


그림 6. 온도가 식각율에 미치는 영향

Fig. 6. Effect of temperature on etch rate.

더 세밀히 분석하기 위하여 질량분석 (QMS)를 이용하여 여러 성분의 peak intensity를 검토하고 특히 화학적 식각반응의 주요요소인 F 농도변화를 관찰하기 위하여 전하당 질량비 (mass per charge ratio) 19인 peak 변화를 살펴보았으며 그 결과를 Fig. 6에 함께 나타내었다. F⁺ peak도 식각율과 마찬가지로 20%에서 극대치를 보였는데 이는 산소가 첨가될수록 SF_n 라디칼 등과 반응하여 F 라디칼 생성을 촉진시키기 때문인데 이때의 반응식은 다음과 같다.



일단 생성된 불소는 SF_n 라디칼과의 재결합 반응 과정에서 반응식 (R2)-(R3)와 같이 산소와 불소가 재결합 경쟁을 하므로 산소가 첨가되지 않은 경우에 비하여 생성된 F 라디칼의 재결합을 어느정도 방지시키므로 식각율이 증가되는 것으로 보인다.



순수한 SF₆ 기체를 사용한 경우에는 주로 WF₆이 생성이 되고 SF₆ - O₂ 혼합기체를 쓸 경우에는 주로 WF₆와 WOF₄ 생성이 되는데 산소가 첨가될수록 WOF₄의 양이 증가하다가 어느일정량 이상 첨가되면 감소된다는보고^[6, 14]가 있다. 또한 산소가 첨가되면 휘발성이 높은 sulfur-oxy-fluoride (SOF, SOF₂, SOF₄, SO₂F₂, ...)가 생성되어 박막표면에 흡착될 수 있는 황(sulfur)성분을 제거하여 준다는 보고도^[7]

¹⁵⁾ 있다. 이러한 여러가지 자료들은 소량의 산소첨가가 텅스텐의 식각율을 증가시킬 수 있음을 뒷받침하고 있으나 산소첨가가 오히려 식각율을 떨어뜨리거나 ^[5,9,12], 식각율을 계속 증가시키거나 ^[6], 혹은 20%보다 훨씬 높은 비율의 산소첨가에서 식각율이 극대점을 보였다는 연구결과가 ^[6] 있다. 이러한 산소첨가에 따른 결과차이의 원인을 정확히 단정할수는 없으나 반응기의 구조 및 형태, 전극의 종류, 조업조건등의 많은 변수가 식각 공정에 영향을 주기 때문이라 짐작된다. 20% 이상의 산소가 첨가되었을 경우에 식각율은 계속해서 감소하는데 이는 총유량을 고정시키고 산소의 양을 늘려나가 F 라디칼의 생성원인 SF₆의 유입량이 줄어드는 희석효과 때문이다.

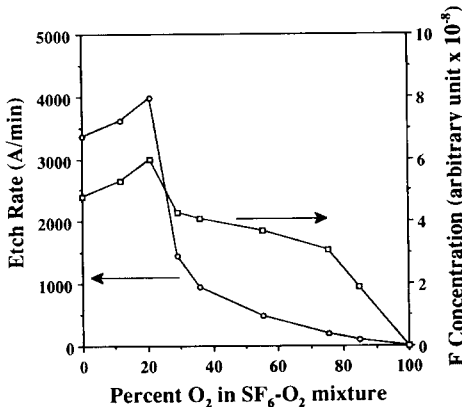


그림 7. 산소 첨가가 식각율과 F⁻ 농도에 미치는 영향

Fig. 7. Effect of oxygen addition on etch rate and F⁻ concentration.

아르곤(Ar) 기체를 산소첨가의 경우와 마찬가지로 방법으로 SF₆ 기체에 첨가하면서 식각율의 변화를 살펴보았다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 아르곤이 20% 첨가될 때까지 식각율과 질량분석기로부터의 F⁻ peak가 약간 증가하였으며 그 이상으로 아르곤이 첨가 된 경우에는 희석효과에 의해 식각율이 감소되는 것으로 나타났다. 소량의 아르곤 기체가 첨가되었을 경우에는 반응기내에 생성된 아르곤의 metastable의 수명시간이 길어 반응식 (R4) - (R5)와 같은 "Penning ionization" 혹은 "Penning dissociation" ^[26,29]에 의해 이온화 및 해리현상이 촉진되기 때문이라 생각된다.

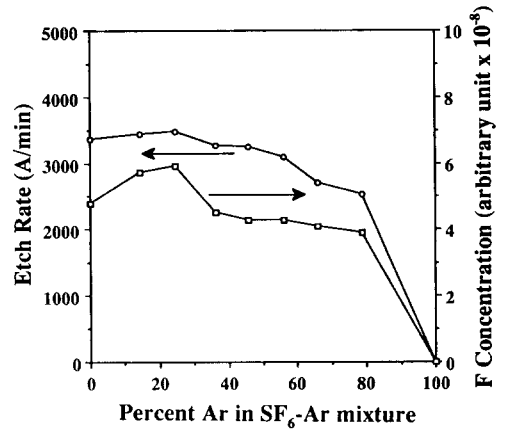
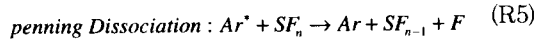
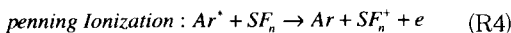


그림 8. 아르곤 첨가가 식각율과 F⁻ 농도에 미치는 영향

Fig. 8. Effect of argon addition on etch rate and F⁻ concentration.

총유량을 20sccm로 고정시키고 질소 (N₂) 첨가에 따른 변화를 관찰한 결과 식각율과 F⁻ peak 모두 질소기체가 첨가됨에 따라 완만하게 감소하다가 점차로 급격하게 감소하는 경향을 보였는데 이는 질소첨가에 따른 희석효과때문이라 생각된다. SiO₂ 재질의 음극을 사용하였을 경우 약간의 질소가 첨가됨에 따라 기판을 때리는 이온의 에너지를 상승시키고 동시에 음극에서 방출되는 산소성분에 의해 식각율이 상승될 수 있다는 보고 ^[7]가 있었으나 본 연구에서는 stainless steel 재질의 음극을 사용하여 이러한 결과를 확인할 수 없었다.

식각율의 균일도를 조사하기 위하여 아랫전극의 세 지점 (r=0, 3, 6 cm)에 시편을 올려 놓고 식각실험을 수행하였다. 균일도에 가장 큰 영향을 주는 조업변수가 압력이므로 20, 60, 100, 200, 400 mtorr의 압력에서 살펴보았다. 200과 400 mtorr의 압력에서는 전극의 중심부분에서 식각율이 중간지점이나 가장자리의 식각율보다 높게 나타났으며 이는 압력이 높을수록 반경방향으로의 전자의 확산율보다 부착(attachment) 반응율이 좀 더 우세하게 작용하고 반응기벽에 가까울수록 전자의 밀도가 감소하기 때문이라 생각되어진다. 압력이 낮아질수록 중성자 및 전하입자들의 기상에서의 확산이 증가되어 균일도가 향상되었는데 특히 100 mtorr 이하의 압력에서는 4% 미만의 균일도를 유지할 수 있었다. 다만 20 mtorr의 압력에서는 전극의

가장자리 부근에서 식각율이 높게 나타났는데 이는 Nagy^[30]가 보고한 바와 같이 전극의 끝의 돌출부분에 전기장이 크게 걸려서 보다 조밀한 밀도의 방전을 일으킨다는 edge effect라 생각된다.

2. 잔류기체 조성분석과 종말점 측정

질량분석기를 이용하여 SF₆ 플라즈마내에 잔류기체 조성분석을 한 결과 SF_n⁺ (n=1~5), F⁺ 라디칼 peak들이 관찰되었는데 이 라디칼들은 주반응물인 SF₆에서 해리된 것이며 이 중에서 F 라디칼이 텅스텐 박막을 화학적으로 식각시키는 주요성분이다. 이밖에도 SO⁺, SOF⁺, SOF₂⁺ 등 미량의 다른 성분들도 존재하였는데 이는 반응기의 leak로 인한 불순물의 영향이라 생각된다.

실제 식각공정에서는 정확하게 원하는 박막의 두께만을 식각시켜야 하기 때문에 종말점을 정확하게 탐지할 수 있어야 한다. 종말점을 탐지하는 방법으로는 optical emission spectroscopy, laser interferometry, self-DC-bias curve, 질량분석기, Langmuir probe 등 여러가지 방법이 있다.^[1,31] 본 실험에서는 Fig. 9와 같이 전하당 질량비(m/e)가 279인 WF₅⁺ peak를 질량분석기로 관찰함에 의해서 종말점을 감지할 수 있었는데 이러한 방법은 실제의 텅스텐 식각 공정에서 overetch되는 것을 방지하는데 활용될 수 있다. 또한 종말점 측정으로 계산한 식각율과 식각전후의 무게차이로 계산한 식각율의 차이가 5% 이하의 오차를 보여 식각율 측정의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

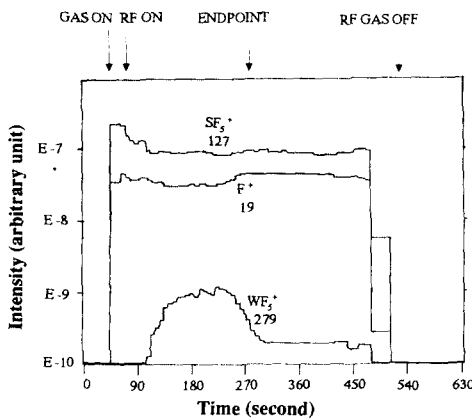


그림 9. 질량 분석기를 이용한 종말점 측정 (20 sccm, 200 mtorr, 50 W, 4 cm)

Fig. 9. End point detection by mass spectroscopy (20 sccm, 200 mtorr, 50 watt, 4 cm).

3. XPS 표면분석결과 및 식각후 표면의 전자 현미경 관찰

Fig.10(a)는 200mtorr, 50watt에서 2분동안 식각한 시료의 표면을 XPS로 분석한 그림이다. 분석결과 텅스텐, 산소, 탄소등의 peak를 볼 수 있었으며 아직 텅스텐이 다 식각이 되지 않았기 때문에 Si peak는 나타나지 않았으며 산소나 탄소의 존재는 대기노출로 인해 오염된 결과라 생각된다. 특이한 점은 SF₆ 플라즈마로 식각을 했음에도 불구하고 F peak를 찾아볼 수 없었다는 점인데 이는 불소가 휘발성이 높은 WF₆ (비등점 17.5℃) 생성물의 형태로 날아가거나 SF_n⁺ (n=1-6)과 표면 재결합하여 기상으로 날라갔을 것으로 생각된다. Fig. 10(b)는 Fig. 10(a)의 시료를 XPS 장비속에서 14 nm 스퍼터링한 후 분석한 것으로서 대기노출로 인한 오염가능성을 배제한 후 표면분석을 실시한 것이다. 이 경우에는 앞서서처럼 산소, 탄소, peak는 나타나지 않았고 대신 텅스텐 peak가 더욱 선명하게 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 10(c)는 200 mtorr, 200 watt에서 70초 동안 식각한 표면을 분석한 그림으로서 Fig. 10(a)의 50 watt에서 식각한 경우와 비교할 때 산소 peak가 훨씬 크게 나타났으며 50 watt의 경우에는 나타나지 않았던 S와 F peak가 보였다. 이는 전력이 커지면서 강한 전장에서 가속된 SF_n⁺ 이온들에 의한 표면충돌효과에 의한 것으로 생각된다. 따라서 높은 전력에서의 지나친 이온의 물리적 충돌현상은 식각율을 증가시키지만 표면에 손상을 (radiation damage)을 주게 된다는 것을 알 수 있었다. 50 watt의 경우에 비해 텅스텐 peak가 작은 대신에 Si peak가 나타나는 것은 짧은 시간동안 식각시켰음에도 불구하고 높은 식각율에 의해 종말점에 도달하였기 때문이다. Fig.10(d)는 Fig. 10(c)의 시료를 14 nm sputtering한 후 표면분석한 것으로 산소 peak는 작아지고 W와 Si peak가 증가하는 데 이는 대기노출로 인한 오염은 줄어들고 박막 원래의 성분은 더욱 선명히 나타나기 때문이다. 여기서 주의해서 보아야 할 사항은 14 nm sputtering을 한 후에도 S peak가 선명히 보이는데 이는 SF_n⁺ (n=1~5) 이온들이 높은 에너지를 갖고 충돌하여 표면깊이 영향을 주었기 때문이라 생각된다.

식각시킨 후 표면상태 변화를 관찰하기 위하여 전자현미경 (SEM)을 이용하여 박막의 표면사진을 찍었다. 식각하기 전에는 다정질 구조의 텅스텐의 grain들을 비교적 선명하고 입체적으로 볼 수 있었으며 식각후에는 grain들의 경계가 불분명해지고 이온들에 의해 가속 충돌되어 패인 자국들이 나타났다.

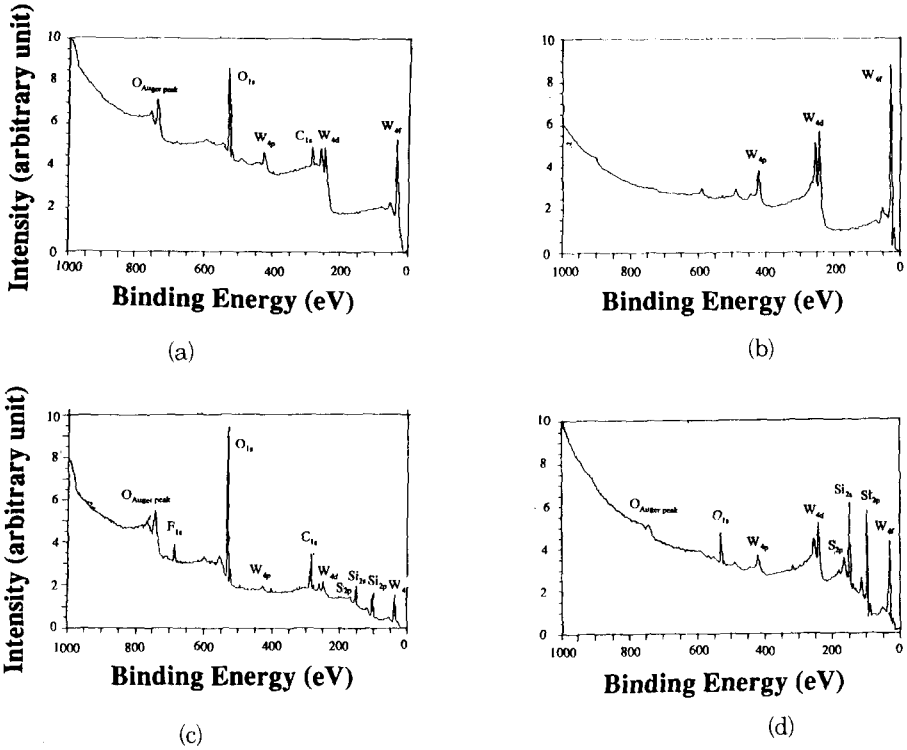


그림 10. 식각된 표면의 XPS 분석

- (a) 200 mtorr, 50 watt
- (b) 200 mtorr, 50 watt (14 nm 스퍼터링을 한 후)
- (c) 200 mtorr, 200 watt
- (d) 200 mtorr, 200 watt (14 nm 스퍼터링을 한 후).

Fig. 10. XPS analysis of etched surface

- (a) 200 mtorr, 50 watt
- (b) 200 mtorr, 50 watt (after 14 nm sputtering)
- (c) 200 mtorr, 200 watt
- (d) 200 mtorr, 200 watt (after 14 nm sputtering).

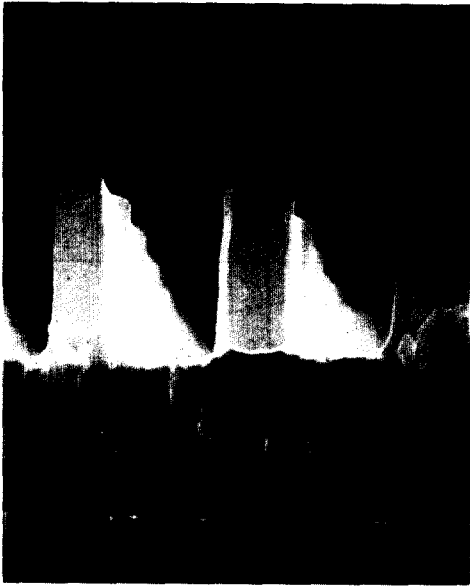
입력전력이 증가할수록 이온에 의한 충돌로 인하여 패인 자국이 훨씬 더 커진 것을 관찰할 수 있었는데 이는 sheath 영역을 통과하는 이온의 에너지가 증가하여 더 빠른 속도로 박막표면과 충돌하기 때문이라 생각된다.

4. 이방성과 선택도 실험

반응조건에 따른 텅스텐 박막의 식각패턴의 변화를 관찰하기 위하여 photoresist 마스크가 입혀진 시편으로 여러 조업변수를 변화시켜 가며 식각실험을 수행한 후 SEM을 이용하여 단면사진을 찍었다. SEM 사진으로부터 텅스텐 박막의 수평방향과 수직방향으로 식각된 깊이와 photoresist mask의 수직방향으로 식각된 깊이를 측정하여 이방성과 선택도를 산출하였다. 식각하기 전의 시료와 기본반응조건에서 식각한 시료의 단면사진을 Fig. 11에 나타내었다. Fig.

11(b)는 기본조건에서 2분 50초 동안 식각한 것으로 mask 밑으로 undercut이 상당히 많음을 볼 수 있는데 식(1)에 의해 계산된 이방성은 0.75이었다.

Fig. 12은 전력의 변화에 따른 이방성과 선택도의 변화를 나타낸 것으로서 전력이 증가할수록 이방성은 점점 악화되는 것으로 나타났다. 즉, 전력이 증가할수록 화학적 식각에 의한 등방적 식각이 많이 진행되어 마스크 밑으로 파여지는 undercut 현상이 심화되는 것을 볼 수 있었다. 이는 전력증가에 따른 이온의 표면충돌에너지 (혹은 self-DC-bias)의 증가율보다 플라즈마내에서의 전자에너지와 밀도의 증가로 인한 F 라디칼의 증가율이 훨씬 빠르기 때문이라 생각된다. 또한 전력이 증가함에 따른 마스크에 대한 텅스텐 박막의 선택적 식각도가 악화되는데 이는 photoresist mask가 F 라디칼에 인한 식각보다는 표면에 충돌하는 이온의 에너지가 커지면 커질수록 더 쉽



(a)



(b)

그림 11. 식각전과 기본 조업조건에서의 SEM 단면사진.

Fig. 11. Cross-sectional SEM image of tungsten films with photoresist for (a) non- etched sample and (b) patterned sample at the base process condition.

계 손상되기 때문이라 생각된다. 특히 200 watt에서는 photoresist mask가 무너져 버리는 것이 관찰되었는데 이는 강한 이온 충돌로 인하여 마스크가 손상이 되었기 때문이라 생각된다.

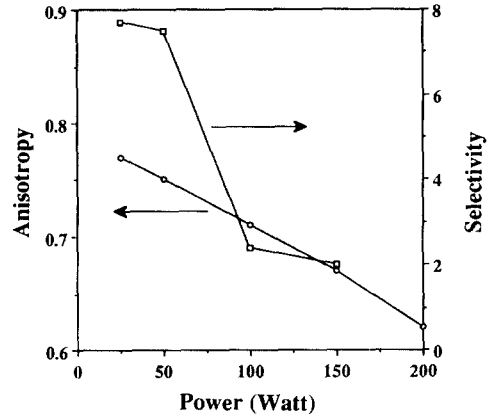


그림 12. 압력이 이방성과 선택도에 미치는 영향

Fig. 12. Effect of power on anisotropy and selectivity.

Fig. 13은 반응압력이 이방성과 선택도에 미치는 영향을 조사한 것으로서 압력이 낮아짐에 따라 이방성이 증가하였다. 특히 20 mtorr에서는 거의 이방적인 식각이 이루어졌으며 photoresist는 높은 self-DC-bias로 인하여 수직방향으로 상당히 손상되었음이 관찰되었다. 압력이 감소됨에 따라 이방성이 향상되는 이유는 저압으로 갈수록 반응성 라디칼의 농도가 감소하고 양이온이 sheath를 통과할 때 scattering이 감소하여 더 높은 운동에너지를 갖고 박막의 표면과 충돌하기 때문이다. 따라서 반응 라디칼에 의한 화학적 식각율은 감소하고 이온보조식각율은 증가하므로 이방성은 증가하게 된다. 압력감소에 의한 sheath에서의 이온에너지 증가는 self-DC-bias의 증가로 입증된다. Photoresist 마스크에 대한 텅스텐의 선택도는 압력이 증가함에 따라 계속 향상되는 것으로 관찰되었는데 이는 이온에너지가 계속해서 감소되기 때문이라 생각된다.

Fig. 14는 전극간 거리변화에 따른 이방성과 선택도를 나타낸 그림으로서 이방성은 전극간 거리가 작아질수록 선택도는 전극간 거리가 커질수록 향상됨을 볼 수 있다. 이 그림들을 Fig. 4와 더불어 해석하면 200 mtorr의 압력에서는 전극간 거리가 커질수록 self-DC-bias 감소로 인해 이온에너지가 감소하지만 체류시간이 증가함에 따라 F 라디칼 생성이 증가하여

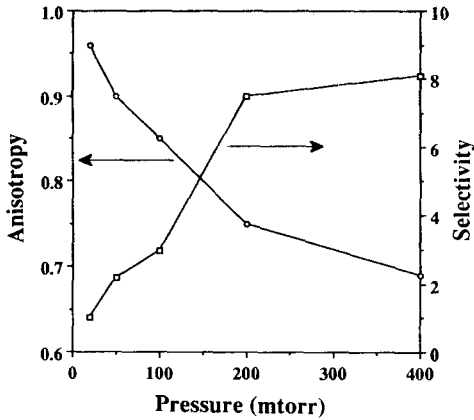


그림 13. 입력 전력이 이방성과 선택도에 미치는 영향
 Fig. 13. Effect of pressure on anisotropy and selectivity.

이방성이 나빠짐을 알 수가 있으며 선택도는 이온에 너지 감소로 인하여 향상되는 것으로 생각된다.

photoresist가 텅스텐 보다 온도변화에 민감하여 20℃ 이상에서 급격하게 감소하였다. 40℃에 비해 2℃에서 텅스텐 박막의 식각율은 19.5% 감소하였지만 이방성과 선택도는 각각 17.1%와 47.2% 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 제시한 텅스텐 박막의 저온식각공정은 이방성과 선택도를 향상시킬 수 있는 좋은 방법으로 생각된다.

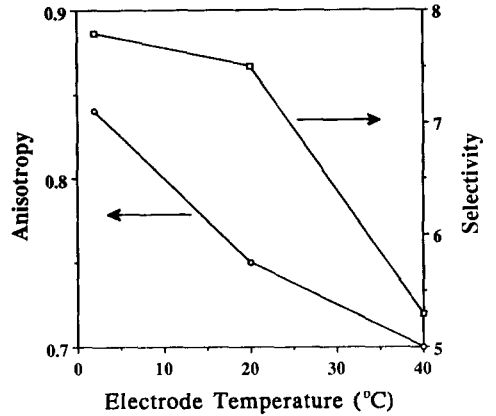


그림 15. 기판 온도가 이방성과 선택도에 미치는 영향
 Fig. 15. Effect of substrate temperature on anisotropy and selectivity.

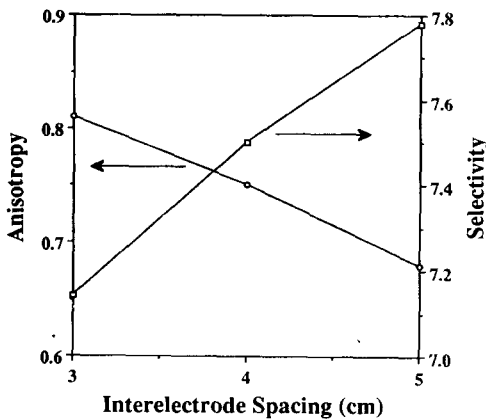


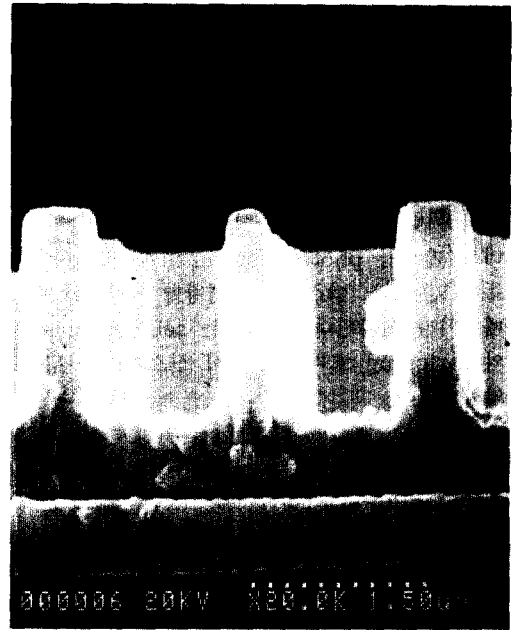
그림 14. 전극간 거리가 이방성과 선택도에 미치는 영향
 Fig. 14. Effect of interelectrode spacing on anisotropy and selectivity.

Fig. 15은 아랫전극의 온도변화에 따른 이방성과 선택도를 나타낸 그림으로서 온도가 낮을수록 이방적 식각패턴을 얻을 수 있었으며 선택도 또한 향상되었다. 저온에서 이방성이 향상되는 이유는 기판의 온도 감소가 주로 화학적 식각율에만 영향을 끼쳐서 수평 방향의 식각율을 감소시키기 때문이다. 선택도는

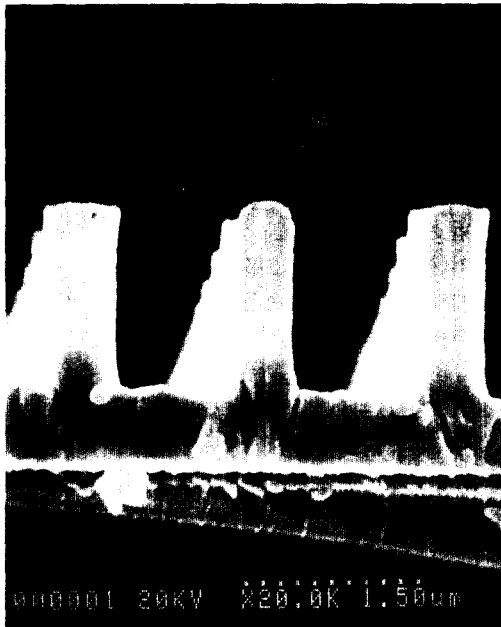
Fig. 16(a)와 (b)는 혼합기체의 총유량을 20 sccm으로 정하고 SF₆ 기체에 CH₄를 7.4%와 19.1% 섞었을 경우의 단면사진으로서 CH₄의 첨가량이 늘어날수록 이방적 식각패턴을 얻었다. 이는 이온의 수직 운동으로 인하여 trench의 바닥보다는 sidewall에 polymeric fluorocarbon이 더 많이 형성되어 수평 방향으로의 식각을 방해하기 때문이다. Blanket 웨이퍼를 이용하여 실험한 결과에도 CH₄가 첨가됨에 따라 식각율이 현저하게 감소하였다. 이러한 fluorocarbon의 형성은 CHF₃을 첨가한 다른 실험^[8,12]에서도 입증되었다. 선택도는 CH₄가 첨가됨에 따라 악화되었는데 이는 F 라디칼이 CH₄에서 해리된 수소와 결합하여 HF를 생성함으로써 F 라디칼 농도가 감소하고 또한 텅스텐 박막 표면에 fluorocarbon이 형성되어 식각율이 감소하기 때문이다. 상대적으로 photoresist는 HF와 반응하여 식각됨으로써 식각 속도의 감소율이 텅스텐보다 작을 것으로 생각된다. CH₄ 첨가에 따른 HF 화합물의 생성은 질량 분석기를 이용하여 확인하였다.



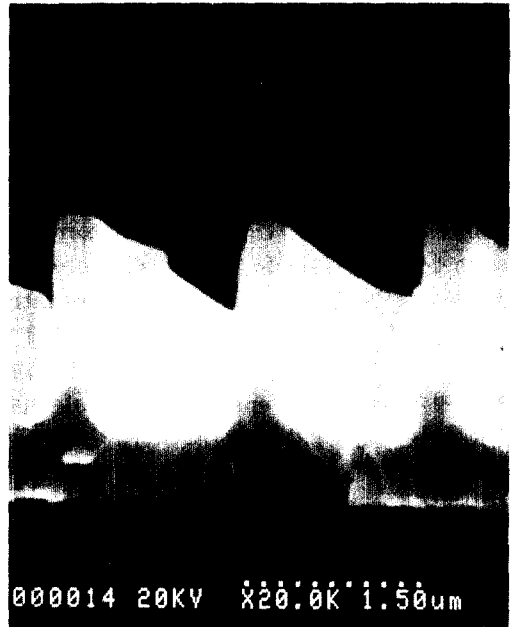
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 16. (a) 7.4 %와 (b) 14.1% CH₄가 첨가되었을 경우의 SEM 단면사진

Fig. 16. Cross sectional SEM image of tungsten films for (a) 7.4 % and (b) 19.1 % CH₄ additions.

그림 17. (a) 11.7 %와 (b) 20.9% O₂가 첨가되었을 경우의 SEM 단면사진

Fig. 17. Cross sectional SEM image of tungsten films for (a) 11.7 % and (b) 20.9 % O₂ additions.

Fig. 17(a)와 (b)는 혼합기체의 총유량을 20 sccm으로 정하고 SF₆ 기체에 산소를 각각 11.7%와 20.9% 섞었을 경우의 단면사진으로서 순수한 SF₆ 기체를 사용하였을 경우보다 산소가 첨가되었을 때 이방적 식각패턴을 얻었는데 이는 산소가 첨가됨에 따라 self-DC-bias가 증가하기 때문이다. 그리고 산소가 11.7% 첨가되었을 경우에 20.9% 첨가되었을 경우보다 이방성이 더 높은 데 그 이유는 산소 첨가량이 너무 많으면 photoresist mask가 strip-ping되어 폭이 넓어져서 텅스텐의 수평방향 식각율이 증가하기 때문이라 생각된다. 선택도는 self-DC-bias의 증가와 stripping 효과에 의해서 산소가 첨가됨에 따라 악화되었다.

IV. 결론

마스크가 없는 웨이퍼 시료를 이용하여 반응조건에 따른 식각율의 변화를 분석한 결과는 다음과 같다. 전력이 증가할수록 플라스마 밀도가 증가하여 식각율은 증가하였다. 이온에 의한 식각과 반응성 라디칼에 의한 화학적 식각이 공동으로 많이 일어나는 200 mtorr의 압력에서 최대 식각율을 얻었다. 압력이 200 mtorr 이하일 경우에는 전극간격이 커질수록 식각율이 증가하였지만 200 mtorr보다 큰 압력에서는 반대로 전극간격이 커질수록 식각율은 감소하였다. 200 mtorr 이하에서는 체류시간의 증가효과가 전자에너지의 감소효과보다 우세하게 작용하기 때문이라 판단된다. 유량의 영향은 압력이 200 mtorr 일때 20 sccm에서 최대 식각율을 얻었으며 400 mtorr에서는 전자에너지 및 밀도가 감소하고 electronegative한 SF₆ 기체의 특성으로 인하여 유량이 증가함에 따라 식각율은 계속 감소하였다. 온도를 변화시키며 실험한 결과 activation energy는 0.046 eV 이었다. 산소기체는 20% 첨가되었을 경우 최대식각율을 얻었으며 Ar의 경우에는 Penning 이온화 및 해리반응으로 인하여 20%까지 첨가되었을 경우 약간 증가하는 경향을 보였으며 N₂가 첨가되면 희석작용으로 계속해서 감소하였다. 저압으로 갈수록 균일도는 향상되었는데 100 motrr 미만에서 대략 4% 정도의 균일도를 얻을 수 있었다. 질량분석기를 이용하여 잔류기체 (F, WF_n, SF_n (n=1~5), ...)의 조성분석을 하였으며 F⁺ peak를 관찰함으로써 반응조건이 식각율에 미치는 영향을 분석하는데 이용하였다. 또한 WF_n⁺ peak를 주시함에 따라 텅스텐 식각의 종말점 탐지하는데 이용하였다. XPS를 통하여 웨이퍼 시료를 표면 분석한 결과 200 mtorr, 50 watt에서는 황이나 불

소에 의한 표면오염을 관측할 수 없었으나 200 watt에서는 황이나 불소에 의한 표면오염이 관측되었다. 200 mtorr, 50 watt에서 식각한 시료표면을 전자현미경을 이용하여 관찰한 결과 식각전에 비하여 grain의 경계가 불분명해지고 이온에 의해 패인 자국을 볼 수 있었는데 이러한 현상은 200 watt의 전력에서 더욱 심해져 강한 에너지의 이온에 의해 손상을 입을 가능성을 보여주었다.

마스크가 입혀진 시료를 이용하여 이방성에 대하여 분석한 결과 전력이 증가할수록 이방성은 나빠졌으며 이는 이온의 표면충돌 에너지보다 F 라디칼의 증가율이 훨씬 빠르기 때문이라 생각된다. 압력이 낮아질수록 이온의 scattering이 감소하여 이방성이 향상되었으며 전극간격이 작아질수록 이온에너지가 증가하고 F 라디칼이 감소하여 이방성이 향상되었다. 또한 온도가 감소할수록 화학적 식각율만을 감소시켜 이방성이 좋아지는 결과를 얻었다. CH₄를 첨가한 결과 sidewall에 fluorocarbon이 형성되어 이방성이 향상되었으며 산소는 약 10% 첨가되었을 때 이방적인 식각 패턴을 얻었다. Photoresist에 대한 텅스텐의 선택도는 전력이 작을수록, 압력이 커질수록, 전극간격이 커질수록 그리고 기판 온도가 작을수록 증가되었다.

감사의 글

본 연구는 1991년도 한국과학재단 연구비지원 (과제번호: 911-1005-023-2)으로 수행한 연구결과의 일부입니다. 웨이퍼 시료를 제공해 준 금성 일렉트론의 이재갑 박사님과 본 논문의 게재비를 지원해 준 포항 공대에 감사드립니다.

參考文獻

- [1] D. M. Manos and D. L. Flamm (Eds.), *Plasma Etching : An Introduction* Academic Press Inc., New York (1989).
- [2] R. S. Blewer, "Progress in LPCVD Tungsten for Advanced Microelectronics Application," *Solid State Technol.*, vol. 29, no. 11, pp. 117-126, 1986.
- [3] S. P. Muraka, *Silicides for VLSI Applications*, Academic Press Inc., New York, 1983.
- [4] D. W. Hess, "Tungsten and Tungsten Silicide Etching in Halogenated

- Plasma," *Solid State Technol.*, vol. 31, no. 4, pp. 97-103, 1988.
- [5] C. C. Tang and D. W. Hess, "Tungsten Etching in CF₄ and SF₆ Discharges," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 131, no. 1, pp. 115-120, 1984.
- [6] A. Picard and G. Turban, "Plasma Etching of Refractory Metals (W, MO, Ta) and Silicon in SF₆ and SF₆-O₂. An Analysis of the Reaction Products," *Plasma Chem. Plasma Proc.*, vol. 5, no.4, pp. 333-351, 1985.
- [7] G. Turban, J. F. Coulon, and N. Mutsukura, "A Mechanistic Study of SF₆ Reactive Ion Etching of Tungsten," *Thin Solid Films*, vol. 176, pp. 289-308, 1989.
- [8] C.-H. Chen, L. C. Watson, and D. W. Schlosser, "Plasma Etching of CVD Tungsten Films for VLSI Applications," in *Tungsten and Other Refractory Metals for VLSI Applications*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., vol. 2, pp. 357-362, 1987.
- [9] S. Adachi and N. Susa, "Reactive Ion Etching of Tungsten Films Sputter Deposited on GaAs," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 132, no. 12, pp. 2980-2989, 1985.
- [10] T. J. Whetten, N. Y. Whetten, and E. D. Wolf, "Reactive Ion Etching of Submicrometer Size Features in Tungsten Thin Films," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, "Tungsten and Other Refractory Metals for VLSI Applications," vol. 2, pp. 363-369, 1987.
- [11] S. Tandon and G. W. Jones, "Reactive Ion Etching of Tungsten in SF₆ and CF₄," in *Tungsten and Other Refractory Metals for VLSI Applications*, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., vol. 4, pp. 165-175, 1989.
- [12] W. S. Pan and A. J. Steckl, "Selective Reactive Ion Etching of Tungsten Films in CHF₃ and Other Fluorinated Gases," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. B6, no. 4, pp. 1073-1080, 1988.
- [13] T. D. Bestwick and G. S. Oehrlein, "Tungsten Etching Mechanisms in CF₄ / O₂ Reactive Ion Plasmas," *J. Appl. Phys.*, vol. 66, no. 10, pp. 5034-5038, 1989.
- [14] M. C. Peignon, Ch. Cardinaud, and G. Turban, "Etching Processes of Tungsten in SF₆-O₂ Radio-Frequency Plasmas," *J. Appl. Phys.*, vol. 70, no. 6, pp. 3314-3323, 1991.
- [15] N. Mutsukura and G. Turban, "Reactive Ion Etching of Tungsten in SF₆-N₂ Plasma," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 137, no. 1, pp. 225-229, 1990.
- [16] D. S. Fischl and D. W. Hess, "Plasma-Enhanced Etching of Tungsten and Tungsten Silicide in Chlorine-Containing Discharges," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 134, no. 9, pp. 2265-2269, 1987.
- [17] R. Rossen, "Magnetically-Enhanced, Patterned-Tungsten Etching," *Microelectronic Manufacturing Technol.*, pp. 17-20, March, 1991.
- [18] T. H. Daubenspeck, E. J. White, and P. C. Sukanek, "Reactive Ion Etching of Tungsten with Chlorinated Fluorocarbons," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 136, no. 10, pp. 2973-2979, 1989.
- [19] T. H. Daubenspeck and P. C. Sukanek, "Investigation and Modeling of Mixed Halogen Freon/Oxygen Plasma Chemistries for Tungsten Etching," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 136, no. 12, pp. 3779-3786, 1989.
- [20] T. H. Daubenspeck, E. J. White, and P. C. Sukanek, "The Investigation of Mixed Halogen Freon/Oxygen Tungsten Reactive Ion Etching Chemistries with Extension to Silicon," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. B7, no. 2, pp. 167-174, 1989.
- [21] M. L. Schattenburg, I. Plotnik, and H. I. Smith, "Reactive Ion Etching of 0.2 μm preiod Grating in Tungsten and

- Molybdenum using $CBrF_3$," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. B3, no. 1, pp. 272-275, 1985.
- [22] M. E. Burba et al., "Selective Dry Etching of Tungsten for VLSI Metallization," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 133, no. 10, pp. 2113-2118, 1986.
- [23] J. W. Coburn and H. F. Winters, "Ion- and Electron-Assisted Gas-Surface Chemistry - An Important Effect in Plasma Etching," *J. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 5, pp. 3189-3196, 1979.
- [24] J. W. Coburn and H. F. Winters, "Plasma Etching - A Discussion of Mechanisms," *J. Vac. Sci. Tech.*, vol. A16, no. 2, pp. 391-403, 1979.
- [25] Y.-J. Lii, "Characterization and Modeling of Plasma Etching of Silicon, Ph.D. Dissertation, University of Rochester, 1989.
- [26] B. N. Chapman, *Glow Discharge Processes : Sputtering and Plasma Etching*, John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 330-337, 1980.
- [27] B. N. Chapman and V. J. Minkiewicz, "Flow Rate Effects in Plasma Etching," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. A15, no. 2, pp. 329-332, 1978.
- [28] S.-K. Park and D. J. Economou, "Numerical Simulation of a Single-Wafer Isothermal Plasma Etching Reactor," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 137, no. 8, pp. 2624-2634, 1990.
- [29] G. R. Scheller et al., "Nonlinear Excitation and Dissociation Kinetics in Discharge through Mixtures of Rare and Attaching Gases," *J. Appl. Phys.*, vol. 64, no. 9, pp. 4384-4397, 1988.
- [30] A. G. Nagy, "Radial Etch Rate Nonuniformity in Reactive Ion Etching," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 131, no. 8, pp. 1871-1875, 1984.
- [31] O. Auciello and D. L. Flamm (Eds.), *Plasma Diagnostics : Discharge Parameters and Chemistry*, Academic Press Inc., New York, 1989.

 著 者 紹 介



朴商奎(正會員)

1960年 2月 11日生. 1978年 3月 ~ 1982年 2月 서울대학교 화학공학과 졸업 (공학사). 1982년 3월 ~ 1984년 2월 동대학원 졸업 (공학석사). 1984년 3월 ~ 1985년 2월 서울대 환경계획연구소 연구원. 1985년 9월 ~ 1990년 4월 Houston대학 화학공학과 졸업 (공학박사). 1990년 5월 ~ 1991년 5월 미국 Motorola, Inc. 연구원. 1991년 6월 ~ 현재 포항공과대학 화학공학과 조교수. 주관심 분야는 반도체 집적회로 제조공정, 신소재 개발, LCD, Plasma display, Micromachining 등임.



徐聖佑

1969年 3月 2日生. 1987年 3월 ~ 1991년 2월 포항공과대학 화학공학과 졸업 (공학사). 1991년 3월 ~ 1993년 2월 동대학원 졸업 (공학석사). 1993년 3월 ~ 현재 미원상사(주) 기술연구소 연구원. 주관심 분야는 반응성 이온 에칭, 화학증착, 반도체 및 CRT용 Photoresist 합성 등임.

李時雨(正會員) 第 28卷 第 6號 參照

현재 포항공과대학 화학공학과 부교수