

## SF<sub>6</sub>플라즈마를 이용한 텅스텐 실리사이드 식각공정에서의 미세 식각형성 특성에 관한 연구

이창덕 · 박상규<sup>1</sup>

경북 포항시 효자동 산 31  
포항공과대학 화학공학과, 산업과학기술연구소  
(1995년 1월 19일 접수)

## Experimental Study of Microscopic Etching Shapes in the RIE Processes of Tungsten Silicide Films Using SF<sub>6</sub> Plasma

Chang-Deog Lee and Sang-Kyu Park<sup>1</sup>

Department of Chemical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH),  
Research Institute of Industrial Science and Technology (RIST),  
San 31 Hyoja-dong, Pohang, Kyungbuk 790-784, Korea  
(Received January 19, 1995)

**요 약** - SF<sub>6</sub> 플라즈마를 이용한 텅스텐 실리사이드 식각공정에서 전력, 압력, 전극간 거리, 기판 온도 등의 공정변수와 Cl<sub>2</sub> 첨가 기체가 식각율, 이방성, RIE Lag 등의 식각특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 입력 전력이 증가할수록 식각율이 증가하였고 RIE Lag는 감소하였다. 식각율은 150 mtorr에서 최대가 되었는데 이는 이온과 반응성 라디칼의 공동작용효과가 가장 크게 나타나기 때문으로 생각된다. 또한 압력이 작아질수록 이온의 에너지가 증가하고 이온의 분산현상이 감소하여 RIE Lag이 감소되었다. 전극간 거리가 감소할수록 식각율은 증가하고 RIE Lag는 감소되었으나 이방성은 악화되는 것으로 나타났다. 기판 온도가 증가할수록 표면 반응이 활발해져 총 식각율은 증가하였으며 반응성 라디칼의 도랑 내부로의 확산이 용이하게 이루어져 RIE Lag가 감소하였으나 화학적 식각의 증가로 이방성은 악화되었다. 염소의 첨가량이 증가할수록 도랑 벽면에 보호막이 형성되어 식각율 및 RIE Lag는 감소하였으며 이방성은 향상되는 것으로 나타났다.

**Abstract** - Experiments on etch processes of tungsten silicide thin film using SF<sub>6</sub> plasma were conducted to investigate the effects of process parameters such as input power, pressure, interelectrode distance, and substrate temperature and Cl<sub>2</sub> addition on the etch characteristics including etch rate, RIE Lag, and the anisotropy. As the input power increased, the etch rate and the RIE Lag decreased. Maximum etch rate was obtained at 150 mtorr. As the pressure decreased, the RIE Lag became smaller and the anisotropy increased. The decrease of the interelectrode distance led to the increase of the etch rate, the improvement of the RIE Lag but the degradation of the anisotropy. The increase of the substrate temperature resulted in the increase of etch rate but the decrease of the RIE Lag and the anisotropy. The etch rate decreased but the RIE Lag and the anisotropy improved with the addition of Cl<sub>2</sub>.

### 1. 서 론

초고집적회로(ULSIC: Ultra-Large Scale Integra-

tion Circuit) 시대로 접어들면서 반응성 플라즈마를 이용한 건식식각(dry etching)공정은 미세소자 제조를 위하여 필수 불가결한 단위공정(unit operation)으로서 그 중요성이 더욱 증대되고 있다. 소자의 박막두

<sup>1</sup> Author to whom correspondence should be addressed

계와 선폭이 감소되고 소자의 구조가 더욱 복잡해지면서 높은 이방성 식각과 선택도, 선폭의 제어, 균일성 등이 점점 더 엄격히 요구되고 있다[1]. 집적회로의 밀도가 증가됨에 따라 종횡비(AR: aspect ratio)가 큰 도랑(trench)구조나 연결구멍(via hole)을 식각하는 기술은 더욱 중요하게 되었으며 이는 3차원 구조를 갖는 초고집적회로의 생산에 없어서는 안될 주요기술이 되었다. 특히 64 MDRAM급 이상의 초고집적 소자의 제조시에는 0.4  $\mu\text{m}$  이하의 선폭과 5 이상의 높은 종횡비를 갖는 도랑구조나 연결구멍의 벽면 프로파일이 수직적으로 식각되는 것을 필요로 한다. 그러나 입구의 넓이가 1  $\mu\text{m}$  이하의 도랑이나 연결구멍의 식각의 경우에 입구의 넓이에 따라 식각율이 달라지는 "RIE Lag" 현상 또는 ARDE(Aспект Ratio Dependent Etching: 종횡비 식각)이라고 불리는 문제점이 제기되고 있다[2]. 이러한 RIE Lag 현상은 Si 식각[3, 8], 산화막 식각[9-12], 고분자 마스크 식각[13-15], GaAs 식각[16], WSi<sub>2</sub>[17] 식각공정에서 관찰 및 보고되고 있으나 이에 대한 이론적인 설명은 플라즈마와 표면 식각반응 메카니즘의 복잡성 때문에 명확하게 밝혀져 있지 않다. 다만 RIE Lag 현상을 일으키는 주요원인으로 (i) 식각 기체 또는 반응성 라디칼의 도랑 내부로의 전달 과정에서의 한계(transport limitation)[18, 19], (ii) photoresist(PR)의 하전(charging)에 의한 이온의 굴절(deflection)[20-22], (iii) 쉬스(sheath)내에서 중성자와 이온의 충돌에 의한 산란(scattering)[23, 24] 등이 보고되고 있다. 이러한 RIE Lag 현상은 소자제작에 있어서 제약이 될 경우가 많은데 예를 들어 bipolar transistor의 제조공정시 연결구멍의 크기가 다를 경우에 작은 크기의 입구에서의 식각이 완료될 무렵에는 큰 입구를 가진 연결구멍에서는 아랫쪽의 박막을 깎아내게 되거나 지나친 undercut 등을 발생시킬 수 있다.

본 연구에서는 텅스텐 실리사이드를 이용하여 미세식각 패턴에 관한 실험을 수행하였는데 텅스텐 실리사이드를 비롯한 내열(refractory)금속과 그 실리사이드 화합물은 4 MDRAM급 이상의 CMOS DRAM과 논리소자(logic circuits)의 양산에 있어 게이트 전극으로 사용되고 있다. 이러한 물질들은 도핑된 단결정 또는 다결정 실리콘에 비하여 낮은 저항율과 Al과 같은 기존 배선물질에 비해 고온에 안정한 물성을 가지고 있기 때문이다[25]. 텅스텐 실리사이드 박막의

식각에는 CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, CF<sub>3</sub>Cl 등의 프레온 기체[26, 27]나 CF<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>[28], BCl<sub>3</sub>/Cl<sub>2</sub>[29, 30], Cl<sub>2</sub>[31, 32], 또는 SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub>[33, 34] 등이 사용되어 왔으나 환경규제에 따른 Cl기가 포함된 프레온 기체의 사용금지과 탄소기를 포함하는 기체의 경우에는 식각벽면에 불화/염화 탄소화합물 라디칼의 고분자 생성반응이 일어나 이를 제거하기 위한 추가공정이 필요하게 되므로 주로 높은 식각율을 가지면서도 오염물 생성이 적은 SF<sub>6</sub> 기체가 널리 이용되고 있는 추세이다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

본 실험에서 사용한 RIE 장비는 단일 웨이퍼 처리용 평행한 플라즈마 반응기로 그림 1에 그 개략도를 나타내었다. 반응기 윗 전극은 직경이 20 cm으로 접지되어 있으며 showerhead를 통하여 반응기체가 균일하게 유입되도록 하였으며 아랫전극은 직경이 14 cm이며 두 전극사이의 간격은 3~5 cm 범위에서 조절할 수 있도록 설계되었다. 아랫전극으로는 13.56 MHz의 주파수를 갖는 고주파 발전기(Auto 전기 ST-350)에 matching network(Auto 전기 LC-500)를 연결하여 전력을 공급하였으며 또한 물과 ethylene glycol 혼합물을 용매로 하여 0~100°C 사이에서 온도를 조절할 수 있는 냉각수 순환기(Cole Parmer L-01270-50)를 이용하여 기판을 일정한 온도로 유지하였다. 진공시스템으로는 rotary vane pump(우성 진공 D55A)와 4인치 확산펌프를 2 stage로 연결하여 사용하였으며 오일의 역류를 방지하기 위해 반응기와 펌프사이에 액체질소 trap을 설치하였다. 반응기 압력과 유량은 독립적으로 조절이 가능하도록 하였는데 유량은 질량유속제어기(MKS 247C)에 의해 조절되었으며 convectron 압력계(Granville Phillips Co. 257)를 이용하여 압력측정을 하였고 일정한 반응기 압력을 유지하기 위하여 throttle valve와 needle valve를 사용하였다. 실험에 사용한 주반응 기체로는 SF<sub>6</sub>(99.999%)를 사용하였으며 첨가기체로는 Cl<sub>2</sub>(99.99%)를 이용하였다.

### 2.2. 실험방법

본 식각 실험에 사용된 텅스텐 실리사이드 박막은 실리콘 기판위에 1000Å의 산화규소막을 형성한 후

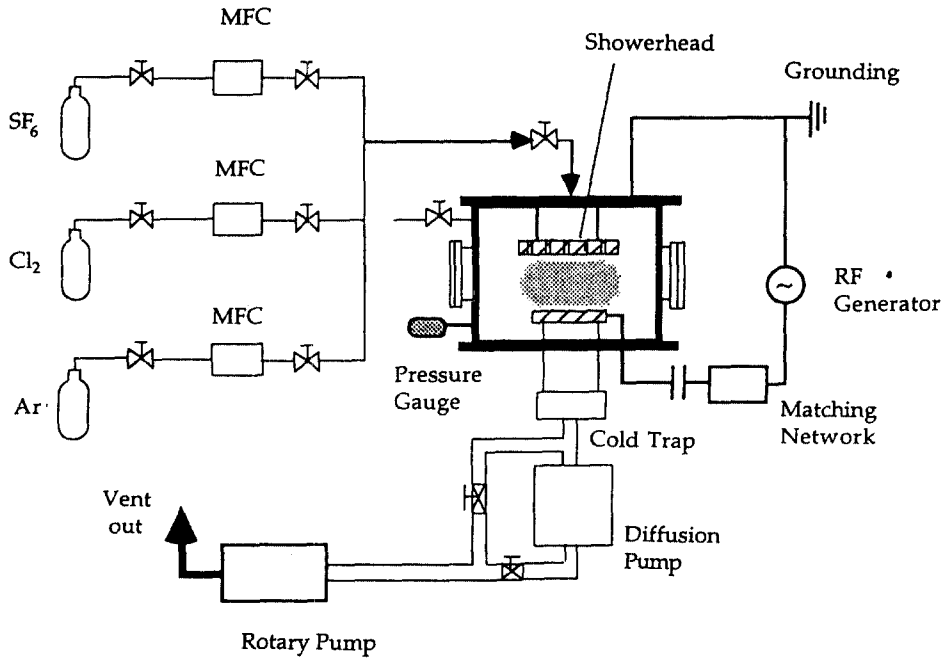


Fig. 1. Schematic diagram of reactive ion etching reactor.

저압화학증착법에 의하여 390°C, 0.7 torr에서 WF<sub>6</sub>(2 sccm)과 SiH<sub>4</sub>(350 sccm)를 사용하여 5000Å 두께의 텅스텐 실리사이드 박막을 증착한 것으로서 W과 Si와의 조성비는 1 : 2.6이었다. 텅스텐 실리사이드 박막 위에는 감광성 고분자 물질인 photoresist(PR)를 마스크(mask)로 이용하여 높이는 동일하나 입구 넓이가 다른 패턴을 형성하였다. 이러한 패턴된(patterned) 웨이퍼 시편을 1.5×1.5 cm<sup>2</sup>의 크기로 잘라서 사용하였으며 식각 후 SEM 사진으로부터 식각율, RIE Lag, 이방성을 산출하였다. PR의 높이는 1.1 μm이고 선폭은 0.54 μm에서 1.57 μm까지 변화하는 마스크 구조를 이용하여 0.68~2.04에서 변화하는 종횡비의 영향을 고찰하였다. 상기한 바와 같이 패턴된 웨이퍼 시편의 단면구조를 개략적으로 그림 2에 나타내었다.

식각공정에서 나타나는 식각 특성을 정량화하기 위하여 종횡비(aspect ratio), 식각율(etch rate), 이방성(anisotropy), RIE lag 등을 다음과 같은 방법으로 정의하였다. 그림 3은 패턴된 웨이퍼를 식각했을 때 반응전과 반응후의 길이 변화를 표시한 것이며 이로부터 여러 식각특성을 산출할 수 있다. 이와 같은

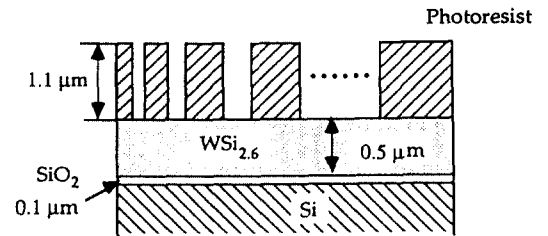


Fig. 2. Illustrative cross-sectional views of patterned tungsten silicide wafer.

식각특성은 식각 마스크의 높이나 폭에 의해 바뀔 수 있으며 다음과 같이 종횡비(Aspect Ratio)를 정의함으로써 이들의 영향을 살펴볼 수 있다.

$$\text{Aspect Ratio} = T/L \quad (1)$$

식각율은 단위시간당 식각된 박막의 깊이로 정의되며 본 실험에서는 SEM으로 관찰된 식각 전후의 박막 깊이의 차를 식각 시간으로 나누어서 식각율을 계산하였다. 이방적 식각(anisotropic etching)은 어느 특정한 방향으로, 주로 기판에 대하여 수직인 방향으로의 식각이 우세하게 발생하는 식각특성으로 식

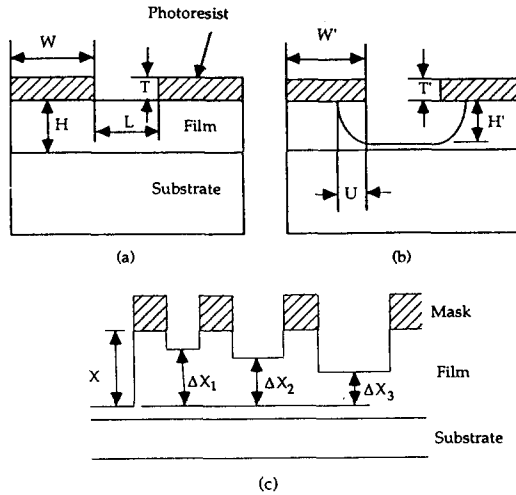


Fig. 3. Diagram for definition of etching characteristics (a) before etching, (b) after etching, and (c) RIE Lag phenomena.

각형상이 반원형의 프로파일을 갖는, 모든 방향으로의 식각율이 일정한 등방적 식각(isotropic etching)과는 구분된다. 본 연구에서는 이방성(Anisotropy: An)을 다음과 같이 정의하였다.

$$An_j(\text{Anisotropy}) = 1 - U_j/H'_j = 1 - R_{Ij}/R_{Vj} \quad 0 \leq An \leq 1 \quad (2)$$

여기서 하첨자 j는 j번째 도랑을 의미하며  $R_{Ij}$ 은 마스크 아래에서의 undercut, 즉 수평방향 식각율이고  $R_{Vj}$ 는 수직방향 식각율을 나타낸다. 기상에서 생성된 반응성 라디칼은 확산에 의해서 등방향으로 움직이지만 양이온은 전극근처에 형성되는 쉬스 영역의 강한 전기장(electric field)에 의하여 가속되어 수직방향으로 직선운동을 하게 된다. 이방성 An이 0인 경우에는 완전 등방성을 나타내며 1인 경우에는 완전 이방성을 의미한다. 대체로 습식식각에 비해서 건식식각이 높은 An값, 즉 이방성을 갖는데 이것이 건식식각공정이 기존의 습식식각을 대체하게 된 가장 큰 이유라 할 수 있겠다.

RIE Lag 현상은 종횡비 또는 선폭에 따라 식각율이 달라지는 현상으로 그림 3(c)에 표시된 부호를 참고로 하여 다음과 같이 정의될 수 있다[6].

$$RIE \text{ Lag}_j = \Delta X_j/X = (X - X_j)/X \quad 0 \leq RIE \text{ Lag} \leq 1 \quad (3)$$

여기서 X는 패턴구조가 형성되어 있지 않은 blan-

Table 1. Basic operating parameter values and range of parameters examined for tungsten silicide etching experiments

Parameter	Basic Values	Ranges
Power(W)	50	50~150
Pressure(mtorr)	200	100~400
Electrode Spacing(cm)	4	3~5
Temperature(°C)	20	0~80
Cl <sub>2</sub> Adding(%)	0	0~80

ket 박막이나 기준이 되는 입구 폭이 넓은 도랑에서의 식각율을 의미하며  $X_j$ 은 j번째 도랑에서의 식각율을 의미한다.  $\Delta X_j (= X - X_j)$ 은 기준이 되는 도랑의 식각율과 j번째 도랑사이의 식각율의 차이를 나타낸다. 따라서, RIE Lag는 blanket박막의 식각율을 기준으로 하여 도랑구조에서 얼마만큼의 식각율이 차이가 나는지를 나타내는 상대적인 지표이다. RIE Lag<sub>j</sub>이 0인 경우는 j번째 도랑에서의 식각율이 기준식각율과 동일함을 나타내며 1인 경우는 j번째 도랑에서 식각이 전혀 일어나지 않았음을 뜻한다.

본 실험에서는 중요한 식각공정변수로서 전력, 압력, 전극간 거리, 기관 온도와 첨가기체의 영향을 분석하였는데 Table 1과 같은 범위에서 실험하였다. 여기서 주의할 것은 플라즈마에는 중성자, 전하입자와 광자 등 여러 입자들이 혼합되어 서로 영향을 주고 있고 한 조업변수를 변화시켰을 경우에 여러가지 내부 변수(internal variable)들이 복잡하게 변화하기 때문에 개별적인 공정변수의 영향을 분석하기 위하여 Table 1과 같이 기본 실험조건을 정하고 한 가지의 조업변수만을 변화시키며 실험하였다. 따라서 이후에 특별히 서술하지 않을 경우에는 기본 조건에서 수행한 실험을 의미한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 입력 전력의 영향

입력 전력(input RF power)이 변화하게 되면 전자의 에너지 분포에 영향을 주게 되어 그 결과 반응성 라디칼과 전자나 이온의 농도에 영향을 미친다. 기관에 수직으로 입사하는 이온의 에너지에 영향을 주는 쉬스 전압은 DC-bias와 플라즈마 전압의 합이 되는데 전력은 전압과 전류의 내적(dot product)이므로 입력

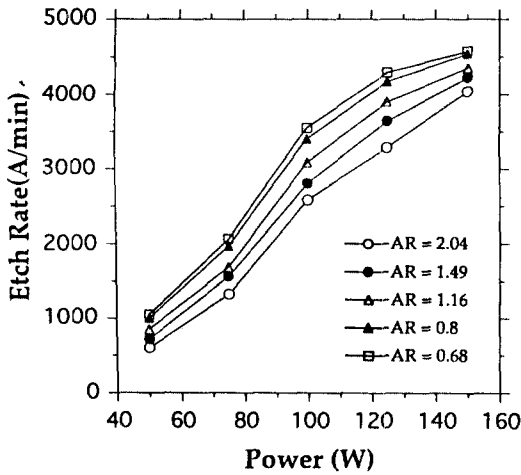


Fig. 4. Effect of input power on etch rate for various aspect ratios.

전력을 증가하게 되면 스위스전압이 증가하게 되어 이온의 표면충돌에너지가 증가하게 되므로 식각율이 증가하게 되고 이방성이 향상된다고 알려져 있다. 그림 4는 입력전력이 식각율에 미치는 영향에 대한 그림으로서 입력전력이 증가함에 따라 식각율이 증가하였다. 입력전력이 증가하면 플라즈마내의 전자가 더 많은 에너지를 얻게 되며 따라서 전자충돌반응 (electron-impact reaction) 즉 여기(excitation), 이온화(ionization)와 해리(dissociation) 반응들이 촉진되어 전자와 이온농도가 증가하고 이에 따른 반응성 라디칼인 F(fluorine)원자의 농도가 증가하여 화학적 식각이 증가하게 된다. 또한 전력이 증가할수록 이온의 농도가 증가하는 것과 더불어 스위스에서 전체의 세기가 증가하므로 이온의 표면충돌에너지가 증가하여 이온에 의한 식각이 증가하게 된다.

그림 5는 입력 전력의 변화에 따른 RIE Lag를 보여주고 있다. 본 연구에서는 도랑입구가 가장 큰, 즉 종횡비가 0.68인 도랑의 식각율을 기준으로 식 (3)을 이용하여 RIE Lag를 산출하였다. 그림 5로부터 입력전력이 증가할수록 RIE Lag가 감소하는 것으로 나타났다. 입력전력이 증가하게 되면 bulk 플라즈마내의 전자의 에너지가 커지게 되어 이온과 전자의 농도가 증가하게 되고 또한 스위스영역에서의 전체의 증가로 이온의 에너지가 커져서 이온에 의한 식각율이 증가하게 된다. 참고로 이온에 의한 물리적인 식각율을 식으로 표현하면 다음과 같다.

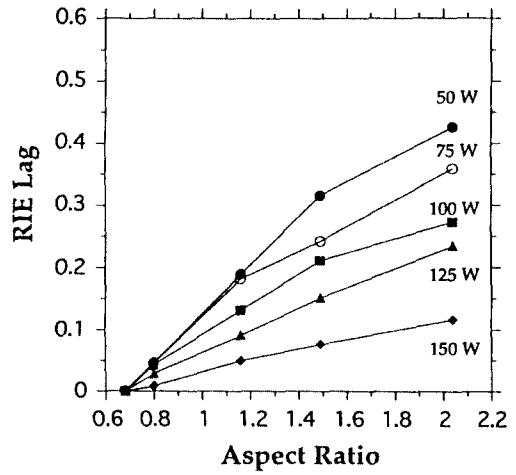


Fig. 5. RIE Lag versus aspect ratio for various input power.

$$\text{Etch Rate}_{\text{physical}} = R_i = k_i \epsilon_i J_i \quad (4)$$

여기서  $R_i$ 는 이온에 의한 식각율,  $k_i$ 는 이온식각 반응속도 상수,  $\epsilon_i$ 는 이온의 에너지,  $J_i$ 는 이온의 플럭스이다. 앞에서 서술한 바와 같이 입력전력이 상승하면 이온의 농도와 에너지가 증가하여 식(4)에서와 같이 이온식각율이 증가하여, 즉 수직적 식각성분이 우세하게 되어 RIE Lag가 작아지는 것으로 생각된다.

### 3.2. 입력의 영향

그림 6은 여러 종횡비에서의 압력에 따른 식각율의 변화를 보여주고 있다. 본 실험에서는 150 mtorr일 때 최대의 식각율을 나타내었으며 이보다 높은 압력이나 낮은 압력에서는 식각율이 감소하는 것으로 나타났다. 입력 전력이 일정할 때 압력이 감소하면 DC-bias는 증가하는 것으로 알려져 있다. 그 이유로는 DC-bias는 접지 전극과 입력전력이 공급되는 전극의 면적비가 클수록 증가하는데, 압력이 감소하면 압력이 클 때에 비하여 플라즈마가 반응관 내로 널리 퍼질 수 있으므로 결과적으로 접지 전극의 면적이 증가하는 것과 같은 효과를 나타내어 주기 때문이다. 또한 압력이 감소할수록 평균자유경로(mean free path)가 증가하게 되어 전자와 중성 입자와의 충돌에 의한 에너지 손실이 줄어들어 전자에너지가 증가하기 때문이다. DC-bias가 증가하면 기관 표면에 도달하는 이온의 에너지가 커져 이온에 의한 식각이 증가하게

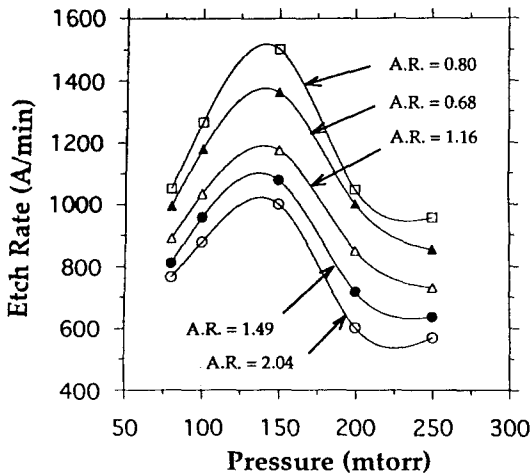


Fig. 6. Effect of pressure on etch rate for various aspect ratios.

된다. 그러나 압력이 감소하게 되면 반응성 라디칼과 같은 활성종(active species)의 농도가 감소하게 되며 또한  $SF_6$  기체의 평균체류시간(mean residence time) 역시 감소하여 bulk 플라즈마에서 해리반응에 의하여 반응성 라디칼이 생성될 수 있는 시간과 생성된 라디칼들이 기판표면과 반응할 수 있는 시간이 부족하게 되므로 화학적 식각은 감소하게 된다. 따라서 150 mtorr 이하의 압력에서 식각율이 감소하는 이유로는 쉬스 지역에서 이온이 충분한 에너지를 얻어 이온에 의한 식각은 향상되지만 반응성 라디칼의 감소에 따른 화학적 식각이 감소되는 영향이 더 커서 총 식각율은 감소하기 때문이라 생각된다. 150 mtorr에서 최대 식각율을 보이는 이유는 반응성 라디칼의 농도 역시 어느 정도 높고 이온도 어느 정도 큰 에너지를 갖고 기판에 충돌하는 효과가 동시에 일어나는 공동작용 효과(synergistic effect)[31,32]때문이라 생각된다. 150 mtorr 이상의 압력에서는 반응기내의 활성종의 체류시간은 증가하나 평균자유경로가 짧아져서 플라즈마 벌크 내의 전자의 평균 에너지가 작아짐으로써 반응성라디칼 농도가 감소하여 화학적 식각율이 감소하게 된다. 또한 압력이 증가할수록 이온의 농도가 작아질 뿐 아니라 DC-bias가 감소하여 이온의 에너지가 작아지고 쉬스 지역에서 이온이 중성자와의 충돌빈도수가 증가함에 따라 이온의 산란현상과 에너지 손실이 심화되어 이온에 의한 식각율이 감소하여 총 식각율은 감소하는 것으로 보여진다. 쉬스를 통과하여

도랑 바닥에 도달하는 이온의 분석을 위하여 이온의 각 분포 함수(ion angular distribution function: IADF)와 이온의 에너지 분포함수(ion energy distribution function: IEDF)에 대해서 많은 연구결과들이 보고되고 있다[24,35,36]. 특히 도랑 내부식각 표면의 한 점에서 입구 쪽으로 열린 가시각(angle of view)이 도랑내부의 식각표면 위치마다 달라서 그곳에서의 IADF와 IEDF가 변하는 것으로 알려져 있다[36]. 이러한 계산은 주로 식각 형상을 전산모사하기 위하여 Monte Carlo 방법으로 수행되었는데 대부분의 결과들이 압력이 증가할수록 IADF와 IEDF가 넓게 퍼지며 표면의 법선으로부터 큰 각도로 입사하는 이온은 그 에너지가 작은 경향이 있는 것으로 보고되고 있어 상기한 실험결과 분석이 타당성이 있음을 보여주고 있다.

그림 7은 압력을 80 mtorr에서 250 mtorr까지 변화시켰을 때의 결과로서 압력이 커질수록 RIE lag현상이 심화되고 있음을 보여주고 있다. 낮은 압력에서는 기체의 평균자유경로가 커서 쉬스 내부에서 이온이 중성분자와 충돌할 확률이 작아지며 이로 인하여 이온들의 분산이 줄어들어 충분한 에너지를 가지고 표면에 충돌하므로 식각율이 종횡비에 크게 영향을 받지 않는다. 하지만 높은 압력에서는 압력이 증가할수록 IADF와 IEDF가 넓게 퍼지게 되어 입사하여 들어오는 이온이 에너지를 잃게 되는데 특히 종횡비가 클 경우 산란된 이온이 도랑 내부의 식각표면까지 들어오기가 힘들어지고 대신 PR이나 도랑 측면과 충돌, 반응함으로써 RIE lag가 심화된다. 또한 식각 반응기체의 전달현상적 측면에서 살펴보면 전자의 에너지가 감소하여 반응성 라디칼의 생성이 적어지는 이외에도 높은 압력에서는 확산계수가 감소하여 반응성 라디칼이 도랑내부의 식각표면까지 쉽게 도달할 수 없으며 종횡비가 커질수록 도랑의 내부로 들어가는 반응성 라디칼이 탈착되어 나오는 반응 생성물과 충돌을 일으킬 확률이 커지므로 화학적 식각율이 저하된다고 생각된다. 그러므로 종횡비가 큰 경우에 RIE Lag현상을 피하기 위해서는 저압의 식각 공정이 필요로 하게 된다.

### 3.3 전극간 거리의 영향

전극간 거리가 식각율에 미치는 영향을 분석하기 위하여 전극간 거리를 3~5 cm범위에서 변화시키며

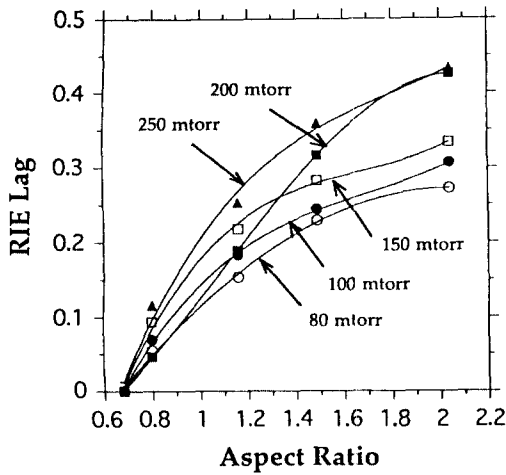


Fig. 7. RIE Lag versus aspect ratio for various pressures.

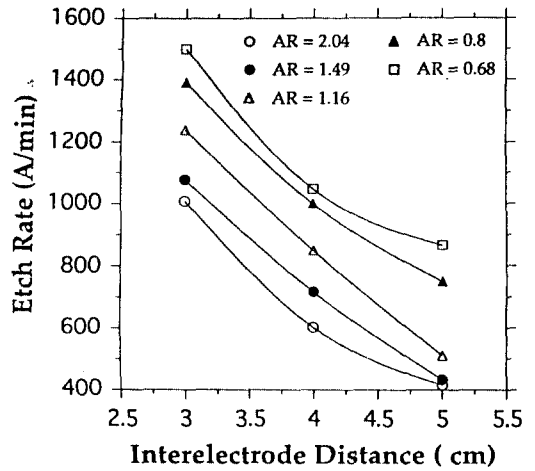


Fig. 8. Effect of interelectrode distance on etch rate for various aspect ratios.

실험하였다. 그림 8에서 보는 바와 같이 200 mtorr의 압력에서는 전극간 거리가 작아질수록 식각율이 증가하였다. 두 전극사이의 전극각 거리의 변화는 음극과 양극 전극간의 면적비를 변화시킨다고 알려져 있는데[37] 동일한 입력 전력에 대하여 전극간 거리가 감소하면 플라즈마와 음극전극 사이의 쉬스 두께가 감소하게 되고 이는 반응기 벽으로의 전하의 손실과 쉬스 영역에서의 중립자와 이온의 충돌, 그리고 플라즈마의 impedance를 감소시키게 된다. 그리고 전극간 거리가 작아지면 플라즈마의 부피가 감소하여 플라즈마 내의 전자에너지 및 밀도가 증가함으로써 반응성 라디칼의 농도가 증가하여 화학적 식각율이 증가하고 또한 DC-bias가 증가하여 이온에 의한 식각율이 증가할 것이라 생각된다. 그러나 전극간 거리가 작아질수록 SF<sub>6</sub> 기체의 체류시간이 짧아져 반응성 라디칼인 F 원자가 생성될 시간이 줄어들며 또한 생성된 F 라디칼이 기판 표면과 반응할 충분한 시간을 갖지 못하는 경우도 생각할 수 있다. 따라서 전극간 거리가 작아질수록 전극간 거리가 플라즈마의 밀도 및 에너지와 체류시간에 주는 영향중 어느 것이 더 우세한가에 따라 식각율이 증가할 수도 혹은 감소할 수도 있다[38]. 본 실험 결과에 의하여 전극간 거리가 체류시간에 주는 영향보다는 플라즈마의 밀도 및 에너지에 주는 영향이 더 우세하여 전극간 거리가 짧아질수록 식각율이 증가하였다고 생각된다. Tandon과

Pant[39]는 SF<sub>6</sub>/O<sub>2</sub>(20%) 플라즈마를 이용한 poly-Si식각실험에서 전극간 거리가 증가할수록 식각율과 DC-bias가 증가하다가 다시 감소한다고 보고하였고 Tsung-Pan[40]은 두 전극을 아주 가깝게 밀착시켰을 때 쉬스가 사라지고 이온이 방향성을 잃어 오로지 화학적 식각만이 존재하여 총 식각율과 이방성이 감소한다고 보고하였는데 이는 SF<sub>6</sub>를 이용한 Si식각 실험에서 전극간 거리가 증가할수록 전자 밀도가 높아져 식각율이 상승하였다는 Lii 등[41]의 결과와 일치한다. 이러한 현상들은 전극간 거리가 3 cm 이하에서 관찰되었는데 본 실험에서는 반응장치의 전극간 거리가 3 cm 이하로는 이동할 수 없었기 때문에 이러한 현상에 관하여 실험할 수 없었다.

그림 9와 10에서는 여러 중횡비에서 전극간 거리에 따른 RIE Lag과 이방성의 영향을 각각 살펴보았다. RIE Lag는 전극간 거리와 중횡비가 커질수록 나빠짐을 알 수 있었다. 전극간 거리가 작아질수록 이온의 에너지가 증가하여 이온에 의한 수직적 식각 성분이 우세해 질 뿐 아니라 플라즈마내 반응성 라디칼의 생성이 증가하여 도랑입구에 라디칼이 더 많이 공급됨으로써 RIE Lag이 감소하는 것으로 생각된다. 그림 10에서 보는 바와 같이 이방성은 전극간 거리가 작아질수록 나빠졌으며 중횡비의 영향은 거의 나타나지 않는 것으로 관찰되었다. 전극간 거리가 감소함에 따라 쉬스 영역에서의 이온에너지의 증가에 따른 화

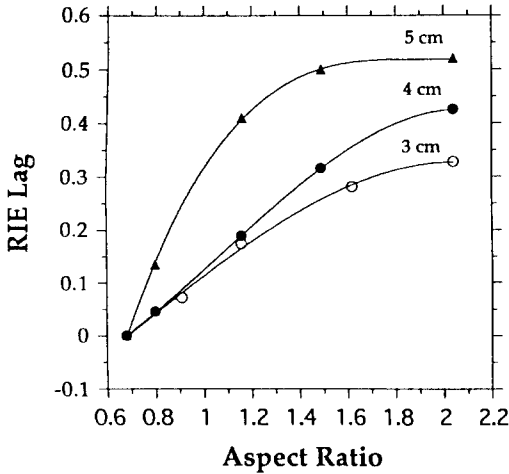


Fig. 9. RIE Lag versus aspect ratio for various interelectrode distances.

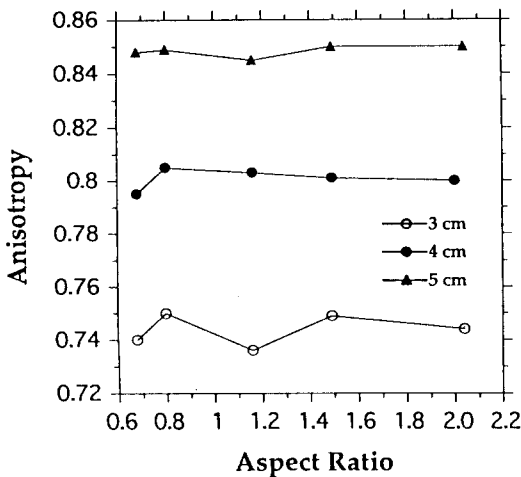


Fig. 10. Effect of aspect ratio on anisotropy for various interelectrode distances.

학적 식각율의 증가가 더 우세하게 작용하여 이방성이 감소하는 것으로 생각된다.

3.4. 온도의 영향

그림 11은 기판온도를 0°C에서 80°C까지 변화시켰을 때의 여러 종횡비에서의 텅스텐 실리사이드이 식각율을 보여주고 있다. 플라즈마 식각공정에서 온도는 압력과 같이 플라즈마 방전 화학과 표면반응에 많은 영향을 주는 변수이다. 저압플라즈마 식각공정의

경우 식각공정은 주로 상온부근에서 이루어지며 기판 표면위에서의 열경계층 두께(thermal boundary layer thickness)는 기판으로 입사하는 활성종의 평균자유 경로보다 훨씬 크다고 알려져 있으므로 기판에 도달하는 반응 활성종의 온도는 기판표면의 온도와 같다고 보아도 무관하다. 기판 표면에서 반응성 라디칼 F와의 표면 반응식은 주로 다음과 같은 Arrhenius식을 따른다.

$$\text{Etch Rate}_{\text{chemical}} = R_n = k_{no} C_F \exp\left(\frac{-E_a}{k T}\right) \quad (5)$$

여기서  $C_F$ 는 반응성 라디칼인 F원자의 몰농도,  $E_a$ 는 활성화 에너지,  $k$ 는 Boltzmann 상수( $1.38066 \times 10^{-23}$  J/K),  $T$ 는 절대온도,  $k_{no}$ 는 상수(pre-exponential factor)이다. 식 (5)에서 볼 수 있듯이 반응성 라디칼에 의한 표면식각 반응은 온도에 지수함수적으로 증가함을 알 수 있다. 본 실험에서는 압력, 입력전력 등의 다른 공정변수들은 일정하게 하고 단지 기판온도만을 변화시켜 실험한 경우로서 주로 화학적 식각의 영향을 고려한 실험이라고 할 수 있다. Arrhenius 도표로 나타낸 그림 11에서 보이는 바와 같이 온도가 증가할수록 이온에 의한 식각율은 고정되어 있지만 화학적 식각율은 식 (5)에서와 같이 증가하여 총 식각율은 증가하는 것으로 나타났다. 이때의 결보기 활성화 에너지는 종횡비가 2.04인 경우, 0.069 eV, 1.49인 경우, 0.057 eV, 그리고 1.16, 0.8, 0.68인 경우 0.045 eV로 도랑 내부에서의 Knudsen 확산과정이 관여되어 종횡비가 증가할수록 결보기 활성화 에너지는 증가하는 것으로 나타났다. 종횡비에 따라서 결보기 활성화 에너지가 변화한다는 실험결과로부터 반응성 라디칼의 도랑내부로의 확산이 미세구조의 식각반응에 중요한 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

그림 12에 온도에 따른 RIE Lag의 영향을 여러 종횡비에서 살펴보았다. 플라즈마에서 생성된 반응성 라디칼은 등방적인 확산(isotropic diffusion)을 통하여 쉬스 영역을 거쳐 식각표면에 도달하게 되지만 종횡비가 크고 깊은 도랑의 경우에는 표면확산(surface diffusion)이나 Knudsen 확산 또는 재방출(re-emission) 메커니즘을 통하여 도랑바닥에 도달하게 된다.  $Cl_2$  플라즈마를 이용한 Si식각에서 활성종인 Cl라디칼에 의한 식각반응 메커니즘은 표면 확산이 주요 전달현상 메커니즘으로[42] 보고되었지만 표면확산 또는 재방



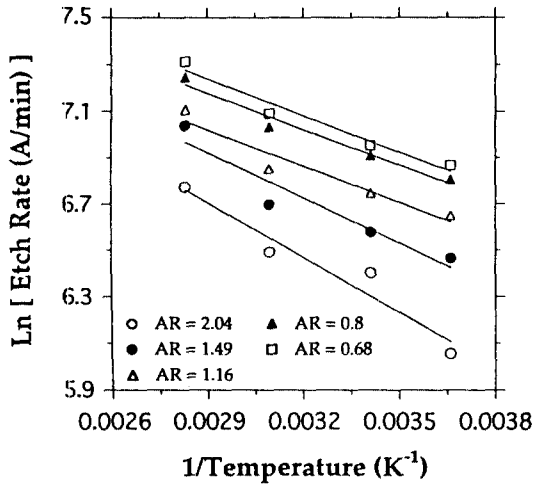


Fig. 11. Effect of substrate temperature on etch rate for various aspect ratios.

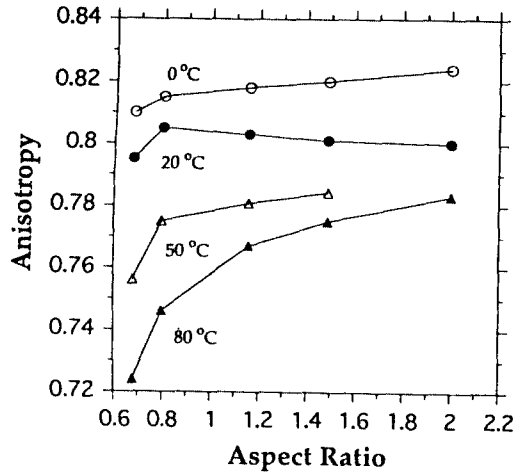


Fig. 13. Effect of aspect ratio on anisotropy for various substrate temperatures.

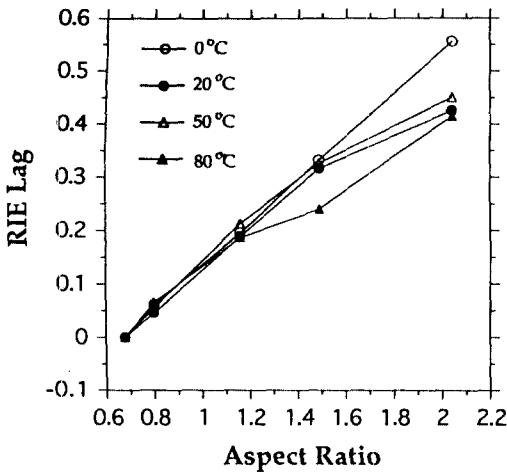


Fig. 12. RIE Lag versus aspect ratio for various substrate temperatures.

출 메카니즘으로는 깊은 도랑의 식각이 어렵다는 연구결과[43]도 있다. 따라서 도랑 내부로의 활성종의 주 전달현상 메카니즘으로는 Knudsen 확산이 중요하다고 생각된다. 본 실험에서 사용한 도랑구조는 직사각형 도랑 구조로서 한쪽에서의 방향이 무한하다고 가정하면 Knudsen 확산계수는 다음과 같이 식(6)으로 표현된다[44].

$$D_k = \frac{W_t}{3} \sqrt{\frac{8RT}{D_p M}} \quad (6)$$

여기서  $W_t$ 는 도랑입구의 폭이고  $R$ 은 기체상수,  $T$ 는 기상에서의 절대온도,  $M$ 은 반응물질의 분자량이다. 예를들어  $1\mu\text{m}$ 의 입구를 가진 도랑의 경우,  $20^\circ\text{C}$ 에서 플라디칼의 Knudsen 확산계수는  $1.9\text{ cm}^2/\text{sec}$ 가 된다. 그림 12에서 종횡비가 클수록 그리고 온도가 작을수록 RIE Lag은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 식(6)에서 유추할 수 있는 바와 같이 종횡비가 클수록(즉, 선폭  $W_t$ 가 감소할수록) 그리고 온도가 감소할수록 Knudsen 확산계수가 감소하여 반응성 라디칼이 도랑 밑 바닥까지 잘 전달될 수 없기 때문이다. 그리고 작은 종횡비보다는 큰 종횡비에서 기판온도가 RIE Lag에 미치는 영향이 더욱 크게 나타난다는 것을 알 수 있다. 그림 13은 여러온도에서 종횡비에 따른 이방성을 보여주고 있다. 온도가 클수록 이방성은 나빠졌는데 이는 온도가 높을수록 도랑내부로의 반응성 라디칼의 확산이 용이하고 반응성 라디칼에 의한 화학적 식각율이 증가하기 때문으로 해석된다. 또한 도랑의 입구가 좁은 즉, 종횡비가 큰 도랑일수록 이방성이 큰 것으로 나타났는데 이 역시 식(6)에서 알 수 있는 바와 같이 도랑의 입구가 좁을수록 반응성 라디칼의 확산이 힘들기 때문이라 생각된다. 또한 이방성은  $0^\circ\text{C}$ 에서 보다  $80^\circ\text{C}$ 에서 종횡비의 영향을 더 크게 받는데 이는 온도가 높을수록 식각표면에서 라디칼에 의한 화학적 식각이 활발하게 일어나며 또한 확산계수가 증가하기 때문이라고 생각된다. 이방성은  $0^\circ\text{C}$ 에서 그 크기가 약 0.82정도로서  $80^\circ\text{C}$ 에 비하여 비교적 향상되었으나

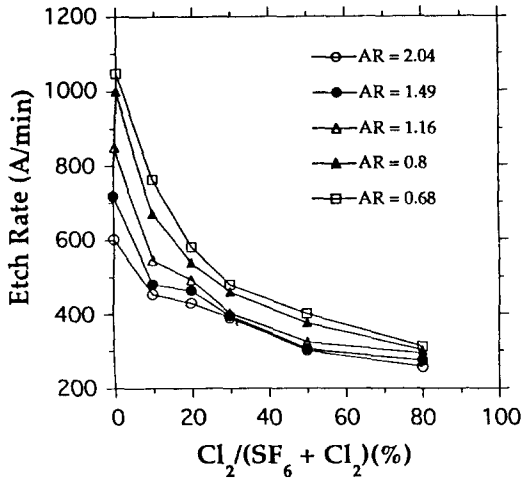


Fig. 14. Effect of Cl<sub>2</sub> addition on etch rate for various aspect ratios.

완전한 수직적 식각이 되려면 훨씬 저온에서의 식각 공정이 필요함을 알 수 있다. 본 연구에서 사용된 냉각 순환기의 용량으로는 0°C 이하로의 온도조절이 불가능하여 더 낮은 온도에서는 실험을 수행하지 못하였다.

### 3.5. Cl<sub>2</sub> 첨가의 영향

총 유량을 20 sccm으로 일정하게 유지하면서 SF<sub>6</sub>와

Cl<sub>2</sub>의 상대적인 양을 변화시켜 가면서 실험하였을 때의 식각율의 변화를 그림 14에 나타내었다. Cl<sub>2</sub>를 첨가하여 실험을 수행한 이유는 SF<sub>6</sub>만으로 식각실험을 수행하였을 경우 심한 undercut으로 인하여 이방성이 나빠서 이를 향상시키기 위해서이며 다른 연구자들의 문헌조사 결과에서도, Cl<sub>2</sub> 혹은 BCl<sub>3</sub>/Cl<sub>2</sub>기체를 사용하였을 때 이방성과 선택도가 좋아졌다는 보고가 있었다[29]. Cl<sub>2</sub>를 첨가하였을 때 Cl<sub>2</sub> 첨가에 비례하여 식각율은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Cl<sub>2</sub> 첨가시 식각생성물이 불화물인 WF<sub>6</sub>, SiF<sub>4</sub>와 더불어 WCl<sub>6</sub>, SiCl<sub>4</sub>와 같은 염화물, 또는 불화염화물이 생성되는데 이러한 염화물 또는 염화불화물은 비등점이 높기 때문에 휘발성이 떨어져서 표면에서 탈착하는 속도가 늦으므로 식각율이 저하되는 것으로 생각된다. 참고로 W와 Si의 염화물과 불화물의 비등점을 Table 2에 나타내었다[45]. 그림 15에 Cl<sub>2</sub>를 첨가하지 않았을 때와 50% 첨가시의 SEM 사진을 나타내었다. 50%의 염소 첨가시에도 undercut이 없어서 이방성이 거의 1인 식각형태를 보여준다.

그림 16과 17에서는 각각 종횡비에 따른 이방성과 RIE Lag의 변화를 여러 염소의 조성에서 살펴보았다. 이방성은 종횡비가 클수록 그리고 염소의 분압이 높을수록 향상되는 것으로 나타났다. 염소의 분압이

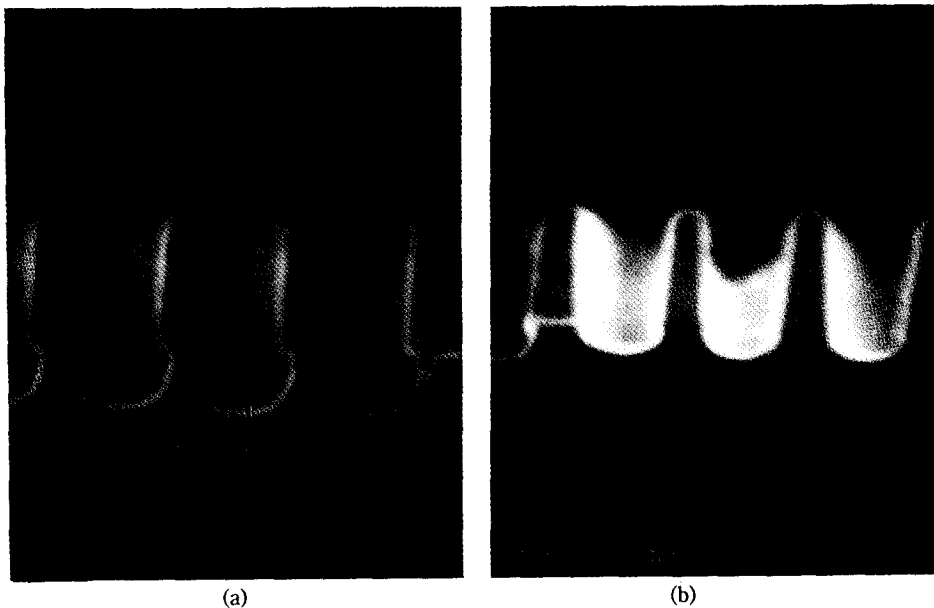
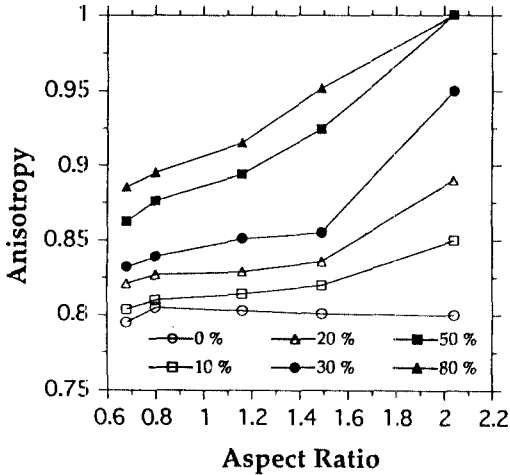


Fig. 15. Cross sectional SEM image of tungsten silicide etched patterns for (a) 0% and (b) 50% Cl<sub>2</sub> addition.

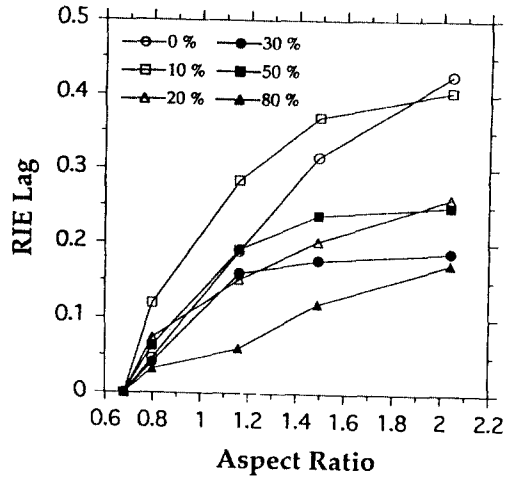
**Table 2.** Melting and boiling points of silicon halides and tungsten halides

SiF <sub>4</sub>	-90.2	-86	SiCl <sub>4</sub>	-70	57.57
Si <sub>2</sub> OFl <sub>6</sub>	-47.8	-23.3	Si <sub>2</sub> OCl <sub>6</sub>	28.1	137
WF <sub>6</sub>	2.5	17.5	WCl <sub>6</sub>	275	346.7
WF <sub>5</sub>	107	247	WCl <sub>5</sub>	248	275.6
WF <sub>4</sub>	527	622	WCl <sub>4</sub>	decomp.	
WOF <sub>4</sub>	110	187.5	WOCl <sub>4</sub>	211	227.5



**Fig. 16.** Effect of aspect ratio on anisotropy for various Cl<sub>2</sub> additions.

증가할수록 이러한 경향이 나타나는 이유로는 식각 반응시 박막표면에 형성되는 염화화합물의 비등점이 높아 휘발성이 크게 떨어지고 또한 염소라디칼과 PR은 서로 반응하여 식각표면에 고분자막을 형성하기 때문이라 생각된다[46]. 이러한 낮은 휘발성을 가진 반응생성물과 고분자막의 형성은 특히 상대적으로 적은 양의 양이온이 충돌하는 도랑의 측면에서 보호막의 역할을 하여 이방성 향상에 도움을 준다. 또한 종횡비가 증가할수록 이방성이 증가하고 있음을 보여주고 있는데 이는 입구의 폭이 좁은 도랑일수록 라디칼의 확산이 어렵기 때문인 것으로 생각된다. RIE Lag는 종횡비가 증가할수록 증가하였으며, 염소의 성분이 증가할수록 약간 증가하다가 10% 이상 염소 성분이 증가하면 감소하는 것으로 나타났다. 도랑의 바닥에서는 이온의 충돌효과에 의해 식각이 활성화되지만 도랑 측면에서는 보호막의 형성으로 인하여 반응성 라디칼만으로는 식각반응이 일어나기 힘들다.



**Fig. 17.** RIE Lag versus aspect ratio for various Cl<sub>2</sub> additions.

따라서, 도랑측면에서 식각반응에 의한 반응성라디칼 입자들의 고갈(depletion)현상이 감소되어 도랑바닥까지 Knudsen 확산에 의한 반응성 라디칼의 공급이 원활하게 이루어지고 입사하는 이온의 도움을 받아 식각에 기여하게 되므로 RIE Lag가 감소하는 것으로 생각된다. 위에서 서술한 결과를 종합하여 요약하면, 도랑의 측면에서는 낮은 휘발성을 가진 생성물과 고분자막이 보호막 역할을 하여 이방성 향상이 이루어지고 도랑 바닥에서는 이온충돌에 의하여 식각이 활성화된다고 보여진다.

#### 4. 결 론

SF<sub>6</sub>플라즈마를 이용한 텅스텐 실리사이드 식각공정에서 전력, 압력, 전극간 거리, 기판온도 등의 공정변수와 Cl<sub>2</sub>첨가 기체가 식각율, 이방성, RIE Lag 등의 식각특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 입력전력이 증가할수록 이온의 에너지가 증가하여 식각율이 증가하였고 RIE Lag는 감소하였다. 압력을 변화시켜가면서 실험하였을 때 150 mtorr에서 최대의 식각율을 보였는데 이는 이온과 반응성 라디칼의 공동작용 효과가 가장 크게 나타나기 때문으로 보여진다. 전극간 거리가 감소할수록 쉬스 두께 및 플라즈마 부피의 감소와 체류시간의 감소로 이온에 의한 식각의 비중의 증가하여 식각율이 증가하고 RIE Lag 은 감소하였으나 이방성은 악화되는 것으로 나타났다.

기관 온도가 증가할수록 표면반응이 활성화 되어 식각율이 증가하였다. 또한 기관 온도가 증가할수록 반응성 라디칼의 도랑 내부로의 확산이 용이하게 이루어져 RIE Lag가 감소하였으나 화학적 식각의 증가로 이방성은 나빠졌다. 염소의 성분이 증가할수록 도랑벽면에 보호막 형성으로 식각율 및 RIE Lag는 감소하였으며 이방성은 좋아지는 것으로 나타났다.

### 감사의 글

본 연구는 포항공대의 순수기초과제(과제번호: 9R 2084)와 한국전자통신연구소의 차세대반도체 선형기초기술연구사업의 지원으로 수행되었습니다. 또한 본 연구에 사용된 패터닝 웨이퍼를 제공하여 주신 삼성전자의 고영범 박사님과 정찬욱 박사님께 감사드립니다.

### 참고문헌

1. J. M. Cook and K. G. Donohoe, *Solid State Technol.*, **34**, 119 (1991).
2. R. A. Gottoscho and C. W. Jurgensen, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B10**, 2133 (1992).
3. T. Arikato, K. Horioka, M. Sekine, H. Okano and Y. Horriike, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27**, 95 (1988).
4. D. Chin, S. H. Dhong and G. I. Long, *J. Electrochem. Soc.*, **132**, 1705 (1985).
5. N. Fujiwara, H. Sawai, M. Yoneda, K. Hishiyoka, and H. Abe, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29**, 2223 (1990).
6. H. C. Jones, R. Bennett, and J. Singh, *Proc. 8th Symp. Plasma Proc.*, **90-2**, 45 (1990).
7. Y. H. Lee and Z. H. Zhou, *Proc. 8th Symp. Plasma Proc.*, **90-2**, 34 (1990).
8. N. Fusiwara, T. Shibano, K. Nishioka, and T. Sato, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28**, 2147 (1989).
9. H. C. Jones, R. Bennett, and J. Singh, *Proc. 8th Symp. Plasma Proc.*, **90-2**, 45 (1990).
10. S. Samukawa, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 2133 (1994).
11. T. Tsuchizawa, Y. Jin, and S. Matsuo, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 2200 (1994).
12. O. Joubert, G. S. Oehrlein, and M. Surendra, *J. Vac. Sci. Technol.*, **A12**, 665 (1994).
13. M. Gross and C. M. Horwitz, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B8**, 1291 (1990).
14. M. Sato, S. Kato, and Y. Arita, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **30**, 1549 (1991).
15. Y. Horiike, T. Fukasawa, and K. Kubota, *Proc. 2nd Asia-Pacific Conf. Plasma Sci. Technol.*, Daejeon, 7 (1994).
16. C. B. Cooper III, M. E. Day, C. Yuen, and M. Salimian, *J. Electrochem. Soc.*, **134**, 2533 (1987).
17. Y. Maruyama, N. Fujiwara, M. Yoneda, K. Tsukamoto, and T. Banjo, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 2170 (1994).
18. J. W. Coburn and H. F. Winters, *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 2730 (1989).
19. M. K. Avachev, Y. P. Baryshev, V. F. Lukichev, A. A. Orlikovsky and K. A. Valiev, *Vacuum*, **42**, 129 (1991).
20. D. J. Economou and R. C. Alkire, *J. Electrochem. Soc.*, **135**, 941 (1988).
21. S. G. Ingarm, *J. Appl. Phys.*, **68**, 500 (1990).
22. J. C. Arnold and H. H. Sawin, *J. Appl. Phys.*, **70**, 5314 (1991).
23. T. Arikato, K. Horioka, M. Sekine, H. Okano and Y. Horriike, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29**, 2223 (1990).
24. J. I. Ulacia F., C. J. Petti and J. P. McVittie, *J. Electrochem. Soc.*, **135**, 1521 (1988).
25. J. Winnerl, *Semiconductor International*, 81 (Aug. 1994).
26. T. H. Daubenspeck, E. J. White, and P. C. Sukanek, *J. Electrochem. Soc.*, **136**, 2973 (1989).
27. J. M. Parks and R. J. Jaccodine, *Proc. of 8th Symp. on Plasma Proc.*, **90-14**, 701 (1990).
28. F. R. White, C. W. Koburger, D. L. Harmon, and H. J. Geipel, *J. Electrochem. Soc.*, **129**, 1330 (1982).
29. D. S. Fischl and D. W. Hess, *J. Electrochem. Soc.*, **134**, 2265 (1987).
30. R. W. Light and H. B. Bell, *J. Electrochem. Soc.*, **131**, 459 (1984).
31. T. Maruyama, N. Fujiwara, M. Yoneda, K. Tsukamoto, and T. Banjo, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 2170 (1994).
32. M. E. Coe, and S. H. Rogers, *Solid State Technol.*, **25**, 79 (1982).
33. M. Zhang, J. Z. Li, I. Adesida, and E. D. Wolf, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B1**, 1037 (1983).
34. B. N. Chapman, "Glow Discharge Processes: Sputtering and Plasma Etching", John Wiley & Sons Inc., N. Y. (1980).
35. C. B. Zarowin, *J. Electrochem. Soc.*, **130**, 1144 (1983).
36. J. I. Ulacia F. and J. P. McVittie, *J. Appl. Phys.*, **65**, 3484 (1989).
37. H. R. Koenig and L. I. Maissel, *IBM J. Res. Dev.*, **14**, 168 (1970).

38. S. -K. Park, Ph. D. Thesis, pp. 330, Univ. of Houston (1990).
39. U. S. Tandon and B. D. Pant, *Vacuum*, **42**, 837 (1991).
40. A. Tsung-Pan, *J. Electrochem. Soc.*, **83**, 221 (1983).
41. Y. -J. Lii, J. Jorne, K. C. Cadien, and I. E. Schoenholtz, Jr., *J. Electrochem. Soc.*, **137**, 3633 (1990).
42. M. Sato and Y. Yarita, *J. Electrochem. Soc.*, **134**, 2856 (1987).
43. V. K. Singh, E. S. G. Shaqfeh, and J. C. McVittie, *J. Vac. Sci. Technol.*, **B10**, 1091 (1992).
44. B. D. Eldridge, and L. F. Brown, *Amer. Inst. Chem. Eng. J.*, **22**, 942 (1976).
45. D. W. Hess, *Solid State Technol.*, **31**, 97 (1988).
46. M. Mieth and A. Barker, *Semiconductor International*, 222 (may 1984).