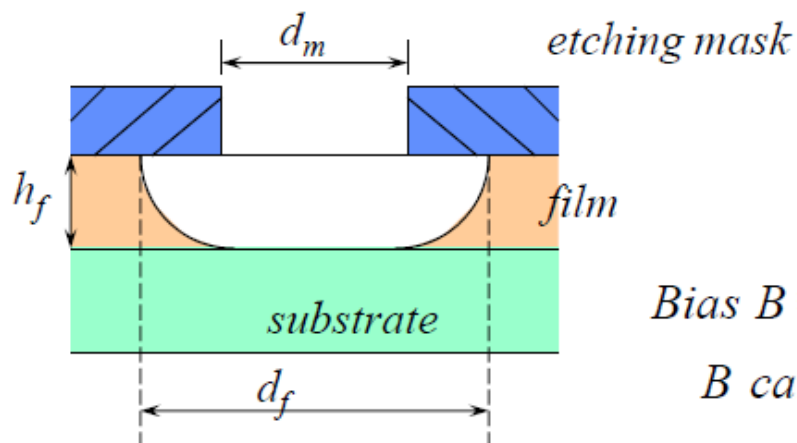


제 11 장 Dry Etching

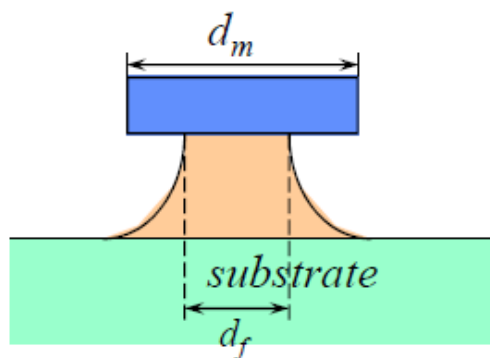
1. Introduction

(1) 식각 기술의 기본적인 용어

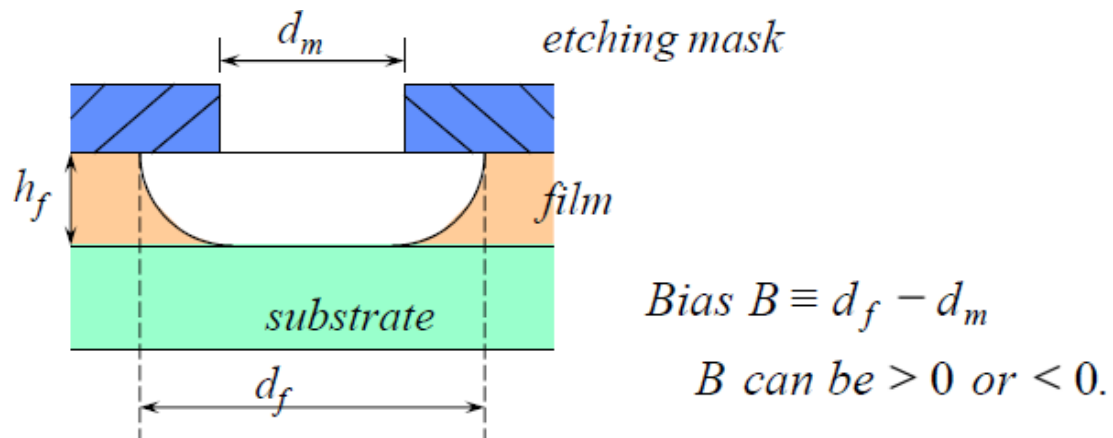
□ Etching bias



Bias $B \equiv d_f - d_m$
 B can be > 0 or < 0 .



□ **Isotropic etching vs. Anisotropic etching**



- **Complete Isotropic Etching**

Vertical Etching Rate = Lateral Etching Rate

$$\therefore |B| = 2h_f$$

- **Complete Anisotropic Etching**

Lateral Etching Rate = 0 $\therefore B = 0$

- **Degree of Anisotropy**

$$A_f = 1 - \frac{|B|}{2h_f}, \quad 0 \leq A_f \leq 1$$

□ Etching Selectivity, S

$$S_{AB} = \frac{v_A (\text{vertical etching velocity of material A})}{v_B (\text{vertical etching velocity of material B})}$$

- Wet Etching S is controlled by:
chemicals, concentration, temperature
- RIE S is controlled by:
**plasma parameters, plasma chemistry,
gas pressure, flow rate & temperature**

Selectivity Example



SiO_2/Si etched by HF solution

$S_{SiO_2, Si}$ Selectivity is very large (~ infinity)

SiO_2/Si etched by RIE (e.g. CF_4 plasma)

$S_{SiO_2, Si}$ Selectivity is finite (~ 10)

[2] 건식각 기술의 종류

① Plasma Etching

- reactive gas plasma, low energy ion bombardment

② Reactive Ion Etching (RIE)

- reactive gas plasma, high energy ion bombardment

③ Sputtering Etching

- inert gas plasma, high energy ion bombardment

□ 건식각 기술들의 특성 비교

파라미터	Plasma Etching	RIE	Sputtering Etching
압력 (Torr)	0.1-10	0.01-0.1	0.01-0.1
전압 (V)	25-100	250-500	500-1000
웨이퍼 위치	접지전극	전원전극	전원전극
화학 반응	Yes	Yes	No
물리적 식각	No	Yes	No
Selectivity	아주 우수	우수	나쁨
Anisotropy	나쁨	우수	아주 우수

[3] 건식각의 장/ 단점

☐ **장점**

- **anisotropic 에칭**
- **가스 소모량 少**
- **Clean Process (Vacuum)**
- **자동화가 용이**
- **미세 패턴 형성 가능**

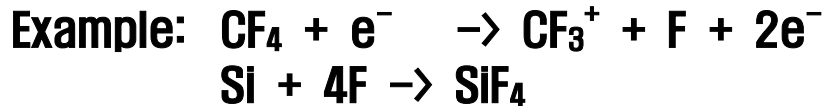
☐ **단점**

- **공정 control 힘들**
- **radiation/plasma damage**
- **고비용 시설 투자**
- **에칭이 잘 안 되는 물질 존재 (Ni, Cu, Al₂O₃)**

2. Basic Physics and Chemistry of Plasma Etching

(1) Plasma Etching Steps

- ① Glow discharge를 통하여 비활성 분자가스로부터 화학적으로 활성화된 반응가스(이온, 원자, radical)생산
- ② 반응가스가 에칭 타겟 물질의 표면으로 이동
- ③ 반응가스가 표면에 흡착
- ④ 표면에서 화학반응하고 휘발성 반응 부산물 생성
- ⑤ 반응부산물이 표면으로부터 탈착
- ⑥ 탈착된 반응 부산물이 gas stream으로 확산되어 pumping-out



- * RIE의 경우에는 에칭 물질의 표면에서 고에너지 (+)이온의 Ion-bombardment도 동시에 진행됨

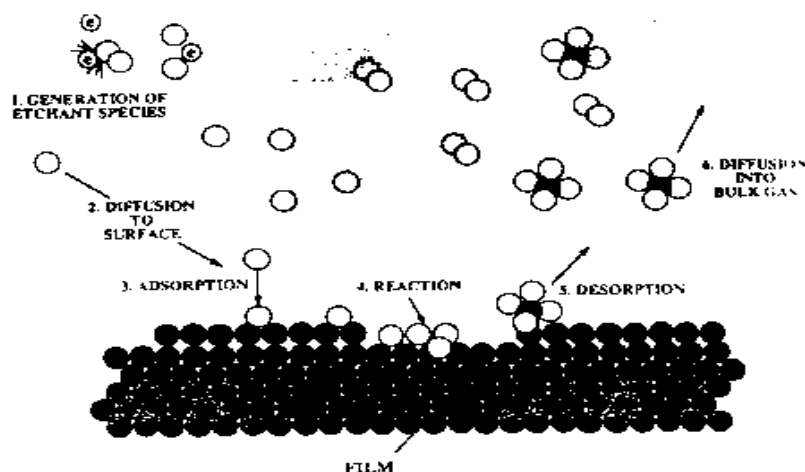


Figure 4. Primary processes occurring in a plasma etch process.

(2) Glow discharge에 의해 생성된 반응 가스

☐ Radical

- 전기적으로 중성인 활성 기체
- 이온화(ionization)나 분해(dissociation)에 의해 생성
[예] $O_2 + e^- \rightarrow O^+ + O + e^-$
- Plasma 내에서 (+) 이온보다 농도가 월등히 높다

☐ (+) 이온

- 분자로부터 여러 가지 종류의 (+) 이온이 발생됨
 - ① Argon Plasma: Ar^+ 가 압도적으로 많으나, 소량의 Ar^{++} , Ar_2^+ 도 생성
 - ② Oxygen Plasma: O_2^+ 가 압도적으로 많으나, O^+ 도 적지 않게 생성되고, 소량의 O_3^+ 도 생성됨
 - ③ Freon Plasma: CF_3^+ 가 압도적으로 많으나, 약간의 CF_2^+ , CF^+ , $C_2F_5^+$, ... 도 생성됨

☐ 에칭이 안 되는 경우

- ① F 가스를 사용한 Al 에칭: AlF_3 가 비휘발성
- ② Cl 가스를 사용한 Ni 에칭: $NiCl_2$ 가 비휘발성
- ③ Cl 가스를 Al_2O_3 에칭:
 $Al_2O_3 + Cl_2 \rightarrow AlCl_3 + O_2$ [열역학적으로 불가]
- ④ Cl 가스를 사용한 SiO_2 에칭:
 $SiO_2 + Cl_2 \rightarrow SiCl_4 + O_2$ [열역학적으로 불가]

3. CF₄를 사용한 Si, SiO₂ 에칭

□ Basic Chemistry:



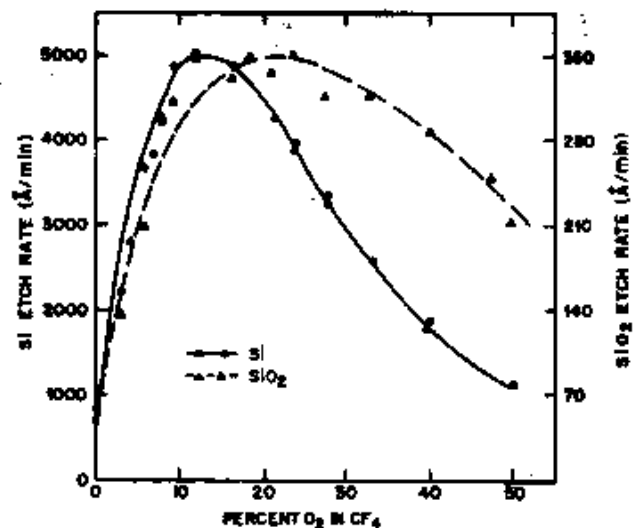
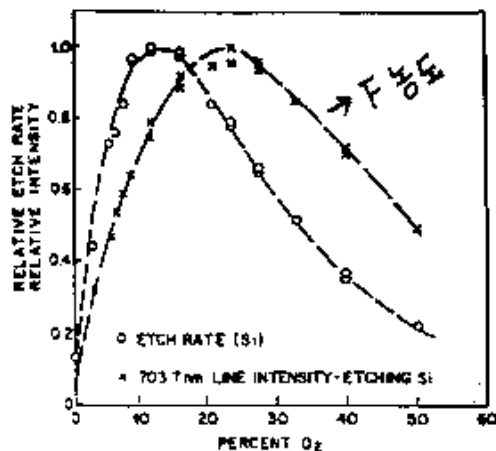
(1) CF₄ + O₂ 에칭

- 산소의 농도를 증가 시 초기에는 F 농도 증가와 함께 에칭속도 증가



- 산소농도가 23% 이상이면 희석으로 F 농도 감소

- 산소는 실리콘 표면에 흡착하여 F이 실리콘과 반응하는 것을 방해 ∴ 산소농도가 12%일 때 에칭 속도 최대



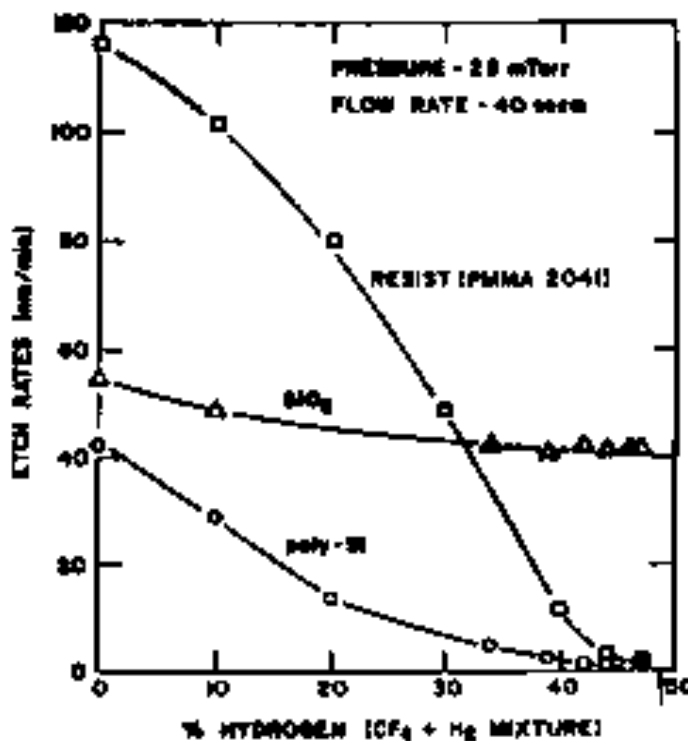
[2] $\text{CF}_4 + \text{H}_2$ 에칭

- 수소가 첨가되면 실리콘의 에칭속도 감소: 40% 이상이면 제로

- 수소가 첨가되면 F 농도 급격히 감소:

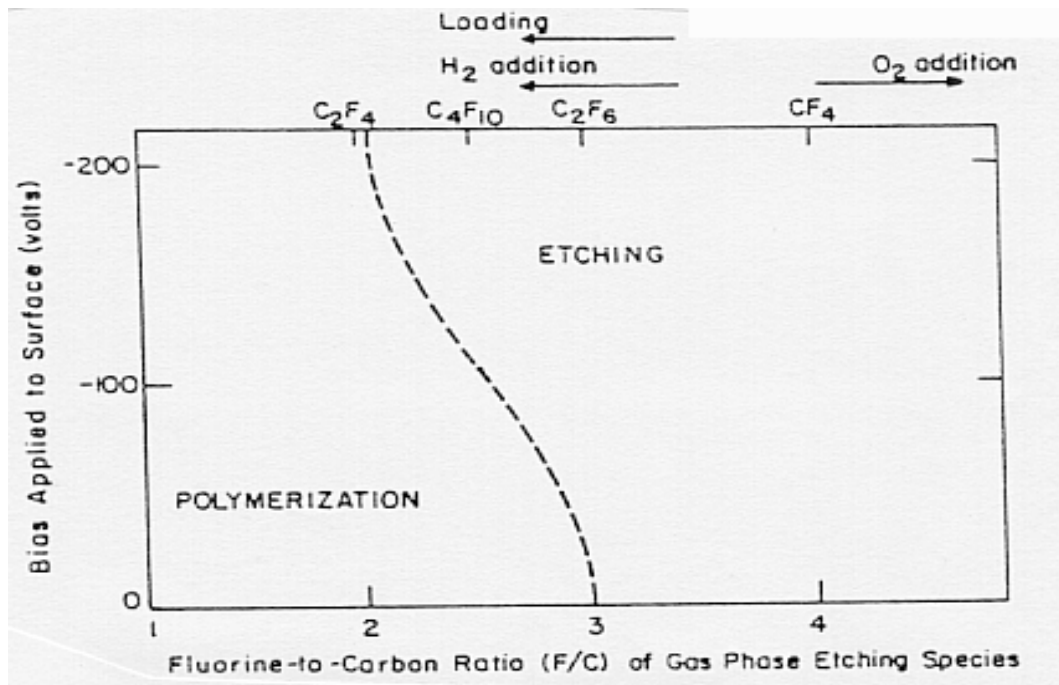


- SiO_2 의 경우: 수소 첨가해도 에칭 속도 안 변함. SiO_2 에 있는 산소가 polymer를 제거해주기 때문



(3) F/C Model (Flourine-Carbon Ratio Model)

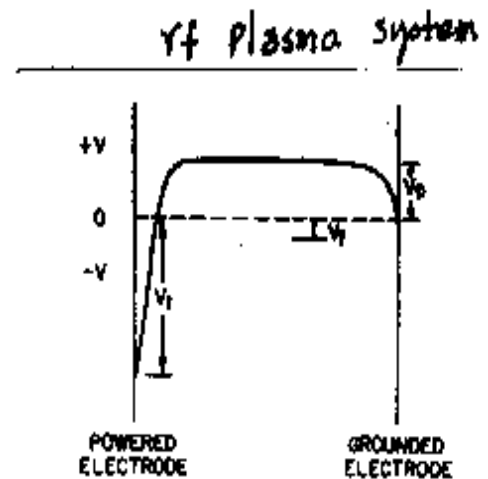
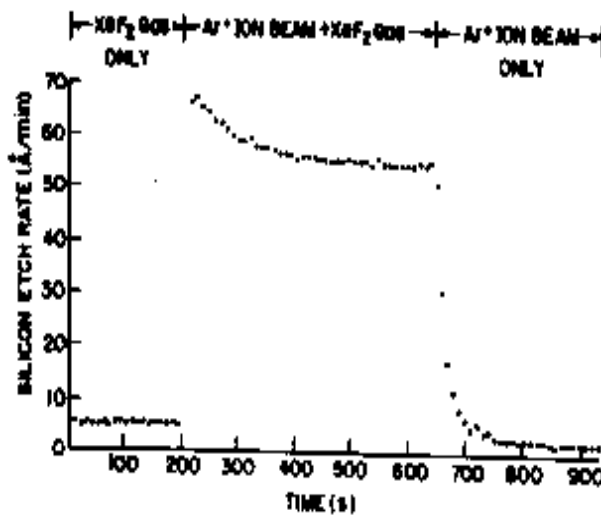
- F/C 비율 증가: 에칭 속도 증가, polymer 형성 감소
F/C 비율 감소: 에칭 속도 감소, polymer 형성 증가



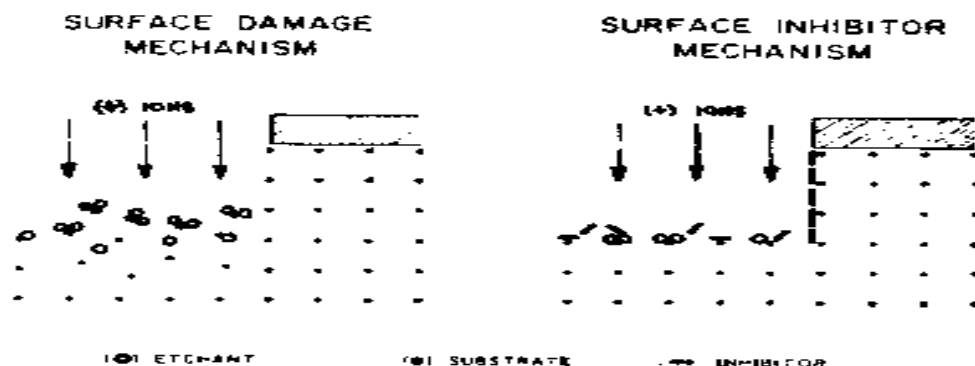
- F/C 비율이 낮을 때의 에칭 특성
 - ① polymer 형성이 잘 됨
 - ② Si 에칭시의 이방성(anisotropy)이 양호
 - ③ SiO₂ 에칭 시 Si에 대한 에칭선택성(selectivity)이 양호
- F/C 비율이 높을 때의 에칭 특성
 - ① polymer 형성이 거의 안 됨
 - ② Si 에칭은 등방성(isotropy) 에칭
 - ③ Si 에칭 시 SiO₂에 대한 선택성이 좋음

4. Anisotropic Etching and Control of Edge Profile

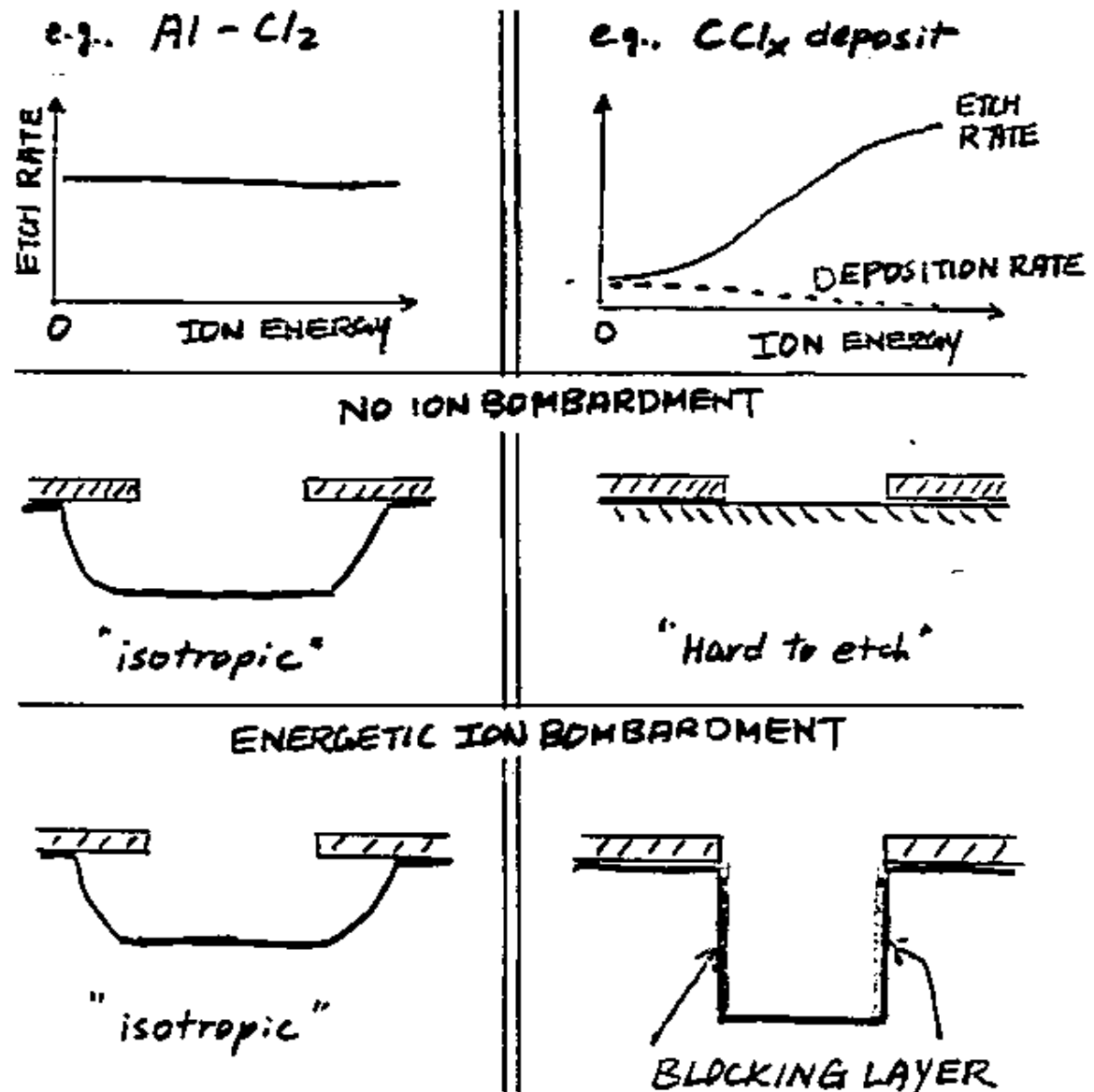
(1) Ion-assisted Etching of Si



- (+) ion이 에칭 속도 및 profile에 미치는 영향
 - 50 eV 이상의 높은 에너지를 갖고 있는 양이온들은 웨이퍼 표면에 damage를 입혀 radical의 화학반응 속도를 향상시킴
 - 50 eV 이하의 낮은 에너지를 갖고 있는 양이온들은 웨이퍼 표면에 증착된 polymer를 제거(단, 이러한 양이온들은 웨이퍼와 수직 방향으로 입사하기 때문에 박막의 옆면에 있는 polymer는 제거하지 못함)



(2) Directionality by blocking layer



(3) Sidewall Blocking

Blocking Mechanism	Example	Blocking Materials
Polymer 증착	Al - CCl ₄	(CCl _x) _s
Polymer 증착	Si - Cl ₂	(CCl _x) _s (?)
Oxidation	Si - CF ₄ /O ₂	SiO _x

- anisotropic etching은 주로 sidewall blocking에 의해 이루어짐
- Resist 에칭은 polymer blocking에 도움이 될 수 있음
- O₂는 polymer를 제거함
 - CF₄/O₂를 사용하여 Si를 에칭할 때 O₂의 농도가 낮을 때는 일반적으로 isotropic etching이 되나, O₂의 농도가 높으면 sidewall에 산화막을 형성하여 anisotropic etching이 되게 함

5. Dry Etching of Various Thin Films

☐ Gas – Solid Systems

Solid	Etch Gas	Etch Product
Si	Cl ₂ , CCl ₂ F ₂	SiCl ₂ , SiCl ₄
SiO ₂ , Si ₃ N ₄	CF ₄ , SF ₆ , NH ₃	SiF ₄
Al	BCl ₃ , CCl ₄ , Cl ₂	Al ₂ Cl ₆ , AlCl ₃
Photoresist	O ₂ , O ₂ /CF ₄	CO, CO ₂ , H ₂ O, HF
Refractory metals/ Silicide (Ti, W, Ta, Mo, TiSi ₂ , WSi ₂ , TaSi ₂ , MoSi ₂)	CF ₄ , CCl ₂ F ₂ , ...	WF ₆ ,

(1) Si/ Polysilicon Etching

☐ 가장 널리 쓰이고 있는 가스

- Cl₂, CCl₄, CF₂Cl₂, CF₃Cl, Br₂, CF₃Br
- 위의 가스들과 inert gas (Ar, He)들과의 혼합
- 다른 가스들과의 혼합: Cl₂/C₂F₆, Cl₂/CCl₄, CF₃Cl/C₂F₆
- F-based 가스를 사용하면 anisotropic 에칭이 어렵고 loading effect가 大
- Cl-based 가스를 사용할 때 에칭 속도가 느려서 C₂F₆, SF₆등의 F-based 가스를 첨가하는 경우도 있다

☐ Typical Etching Selectivity

- SiO₂: 10 – 50
- Si₃N₄: 5 – 10

☐ Sidewall Blocking

- Cl이 resist와 반응하여 polymer 형성
- O₂가 첨가되면, oxide 층이 sidewall 형성
- * 에칭속도는 도핑농도에 의해 크게 영향을 받음

(2) SiO₂ Etching

- ☐ 가장 중요한 SiO₂ 에칭 : contact/ via etching

- ☐ 사용 가스
 - Cl-based 가스 사용은 열역학적으로 불가
 - F-deficient gas를 사용
 - 가장 널리 사용되고 있는 가스: CF₄/H₂, CHF₃, C₂F₆
 - 자주 사용되는 F-scavengers: H₂, C₂H₄, CH₄

- ☐ Si과의 selectivity
 - Si etching의 blocking material: CF_x
∴ Carbon이 있는 가스 사용이 필수적 (SF₆/H₂, F₂/H₂: 사용 불가)
 - 보통 10 이상의 selectivity 달성

- ☐ 에칭 속도와 박막 조건의 관계
 - Thermal oxide보다는 CVD oxide의 에칭속도가 높다
 - Oxide 내의 도핑 농도는 에칭 속도에 영향을 준다

(3) Si_3N_4 Etching

- ☐ Si_3N_4 의 에칭 특성은 Si과 SiO_2 의 중간
 - bombardment가 없을 때의 에칭 속도:
 $\text{SiO}_2 < \text{Si}_3\text{N}_4 < \text{Si}$
- 탄소의 polymer 형성 속도: $\text{SiO}_2 < \text{Si}_3\text{N}_4 < \text{Si}$
- ☐ 사용가스:
 - $\text{CF}_4 + \text{O}_2 + \text{CBrF}_3$
 - CH_2F_2
 - CHF_3
 - SF_6
 - $\text{Cl}_2 + \text{NF}_3$
- ☐ F의 Si_3N_4 에칭
 - Isotropic etching
 - ER of nitride: ER of Si = 1 : 8

$\therefore \text{NO}$ 이 F과 반응하여 NF_3 를 형성 $\rightarrow$ F의 농도 $\downarrow$
- ☐ Interhalogen Molecules(ex; FCl)은 전혀 SiO_2 를 에칭하지 않고 Si_3N_4 를 선택적으로 에칭 (ex. $\text{Cl}_2 + \text{NF}_3$ 사용시, ER of nitride: ER of oxide = 1 : 0)
- ☐ ER of LPCVD nitride $\ll$ ER of PECVD
 - LPCVD nitride의 수소 농도: 4 - 8 wt %
 - PECVD nitride의 수소 농도: 18 - 22 wt %
 - 수소는 $\text{H} + \text{N} + \text{C} \rightarrow \text{HCN}$ (휘발성)의 반응을 촉진 $\rightarrow$ polymer 형성 감소

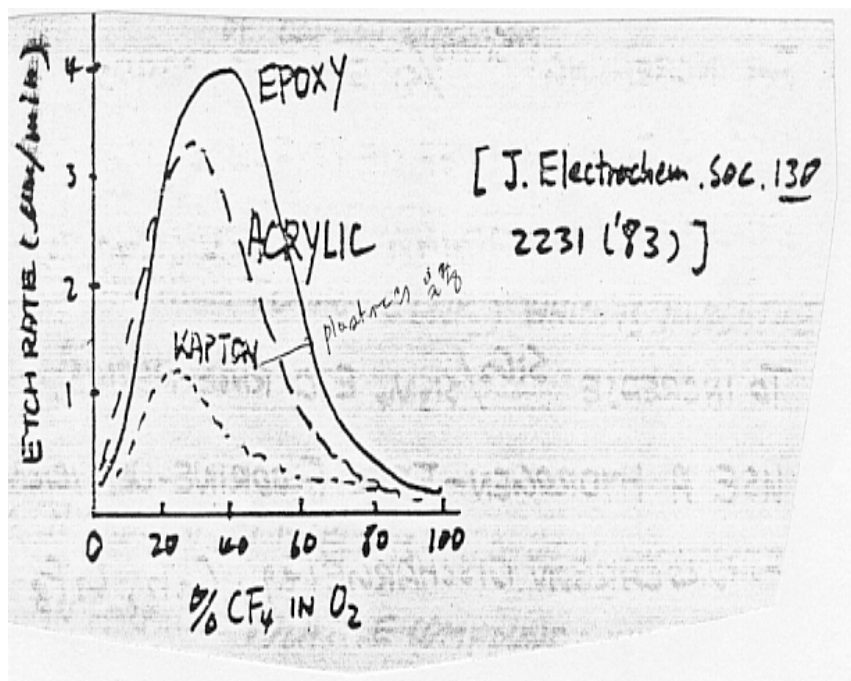
[4] Carbon and Organic Solids

□ Organic solids(ex: photoresist, polyimide)는 O 또는 F에 의해 에칭



□ O₂ plasma에 CF₄ 가스를 첨가하면 organic solid의 에칭 속도가 증가

- F이 H와 반응하여 HF 형성 → O와 C의 반응속도 ↑



(5) Silicide Etching

☐ 에칭할 layer 구조

- Polycide: gate oxide – polysilicon – silicide
- Interconnection line : ILD – silicide

☐ 에칭 요구 조건

- Good vertical etch profile
- ER of silicide $\approx$ ER of n^+ poly Si
- Good selectivity over oxide (> 10)
- Not too much resist erosion

☐ 에칭 가스

- 보통 Cl-based gas 사용

(예) TiSi_2 : $\text{CCl}_4 + \text{O}_2$

WSi_2 : CCl_2F_2

MoSi_2 : $\text{CCl}_4 + \text{O}_2$

TaSi_2 : $\text{Cl}_2 + \text{CF}_4$

☐ F-based 가스 사용도 가능하나 다음의 문제점 있음

- F sufficient 가스: n^+ poly나 silicide에 undercut 발생
- F deficient 가스: oxide에 대한 selectivity가 낮음

(6) Aluminum Etching

☐ Etching Gas

- 보통 Cl-based 가스 사용: BCl_3 , CCl_4 , SiCl_4 , Cl_2 , their Mixtures
- F-based 가스는 사용 불가 $\because \text{AlF}_3$ 가 비휘발성
- Cl_2 분자는 Al을 에칭 (플라즈마 불필요)
- Etching Product: 저온; Al_2Cl_6 , 고온; AlCl_3
- Cl-based gas는 vacuum pump oil을 오염시키고 독성을 갖게 함
 - 형성 물질: HCl , $\text{C}_2\text{Cl}_3\text{H}$, Polymers
 - 문제 발생: oil 점도 증가, 산 형성, Chlorinated Hydrocarbon 오염

☐ Al_2O_3 Etching

- Al 에칭 전에 표면의 Al_2O_3 막(약 30 Å)을 먼저 제거
- Cl 가스는 Al_2O_3 를 제거하지 못함
- Al_2O_3 막의 제거 방법
 - ① (+) 이온의 energetic bombardment
 - ② Reducing reaction (환원반응)
$$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CCl}_x \ (x > 4) \rightarrow \text{AlCl}_3 + \text{CO}$$
$$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{BCl}_x \ (x < 3) \rightarrow \text{AlCl}_3 + \text{B}_2\text{O}_3$$
- Al_2O_3 막으로 인해 발생하는 문제
 - ① Al 에칭이 시작되기 전 induction time 필요
 - ② 산소의 Al 막의 G.B로의 segregation- > over-etch 필요 $\rightarrow$ Al막의 표면 거칠기 증가

□ Al 에칭시의 유의점

① Al Chloride (AlCl_3 , Al_2Cl_6)

- 산소/습기와 아주 잘 반응: SiO_2 를 분해시키거나 산화를 통해 파티클 오염 야기
- 웨이퍼 표면에 응축되는 경향 있음
- Photoresist를 열화시킴

- 해결책: Large Gas Flow Rate를 통해 희석시킴

② Back Ground Gas 오염에 의한 에칭 속도 변화

- Al/ Al Chloride는 산소/습기와 반응을 아주 잘 하여 챔버 내의 산소, 습기의 농도에 따라 에칭 속도가 크게 변함 => 에칭속도의 재현성 문제 야기

- 챔버 내의 산소는 Al 막의 표면 거칠기에 악 영향

- 해결책: Load-Locked System 사용

③ Directionality of Al 에칭

- Cl or Cl_2 에 의한 에칭 속도는 energetic ion bombardment에 의해 증가하지 않음

- Anisotropic 에칭은 sidewall blocking에 의해서만 가능

④ Resist Degradation

- Al Chloride가 resist의 열화를 야기
- 해결책: gas flow rate의 증가 또는 "Hard Bake"

⑤ **Post-etch Corrosion**

- **에칭 후 웨이퍼위에(특히 PR 내) 남아있는 chlorine 가스는 수소와 반응하면 HCl 형성하여 Al을 부식시킴**
- **해결책: 웨이퍼를 unloading 하기 전에 PR 제거, 또한 표면에 Al_2O_3 또는 $\text{AlF}_3(\text{CF}_4 \text{ 사용})$ 막 길러 보호**

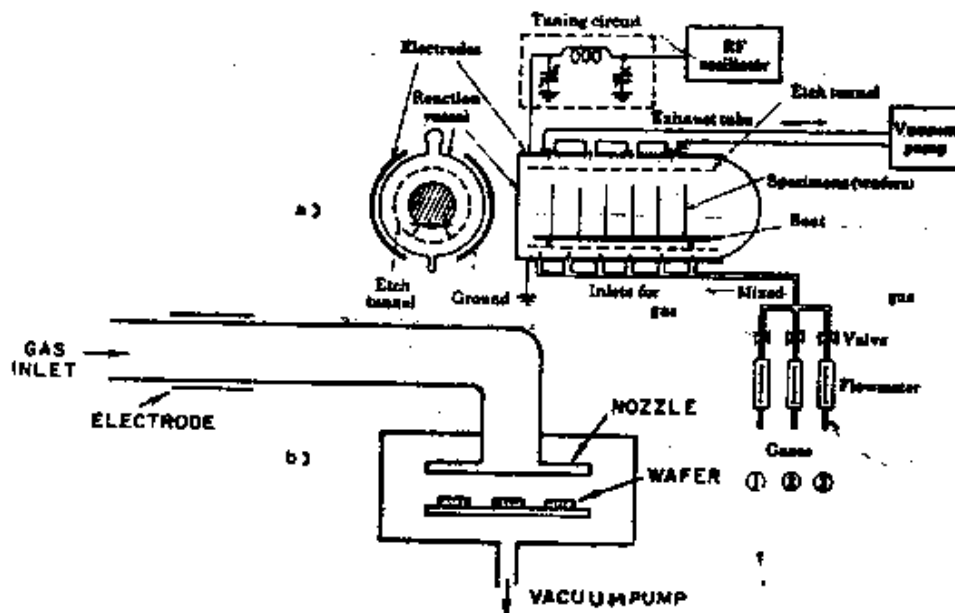
⑥ **Al Alloy (Al-Si-Cu) Etching**

- **Si은 산화만 되지 않으면 에칭에 어려움 없다**
- **Al-Cu 에칭 후, Cu residue가 남음. Cu 2%가 safe limit**

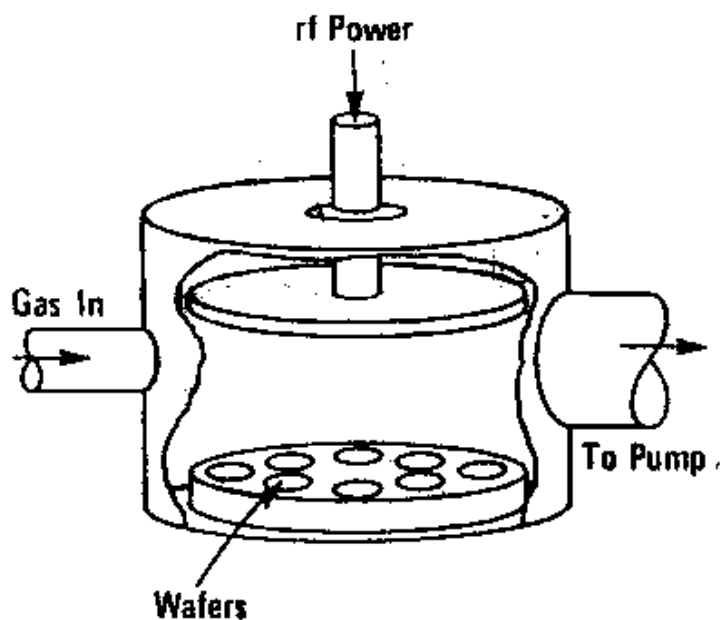
6. Dry Etching 장비

(1) Plasma Etching Reactors

☐ Barrel System

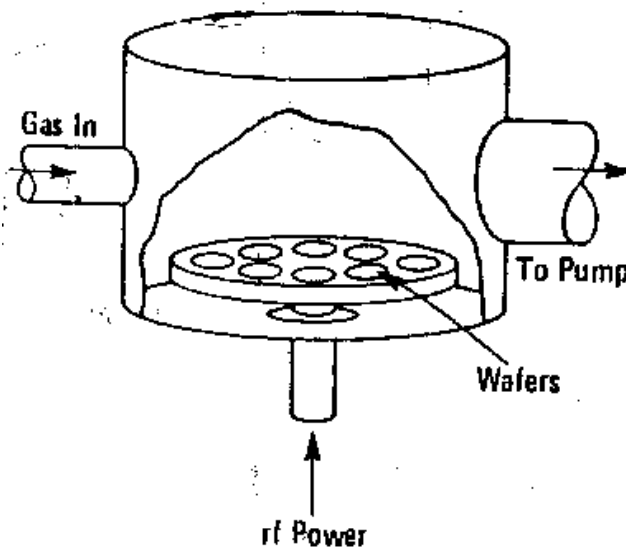


☐ Planar System



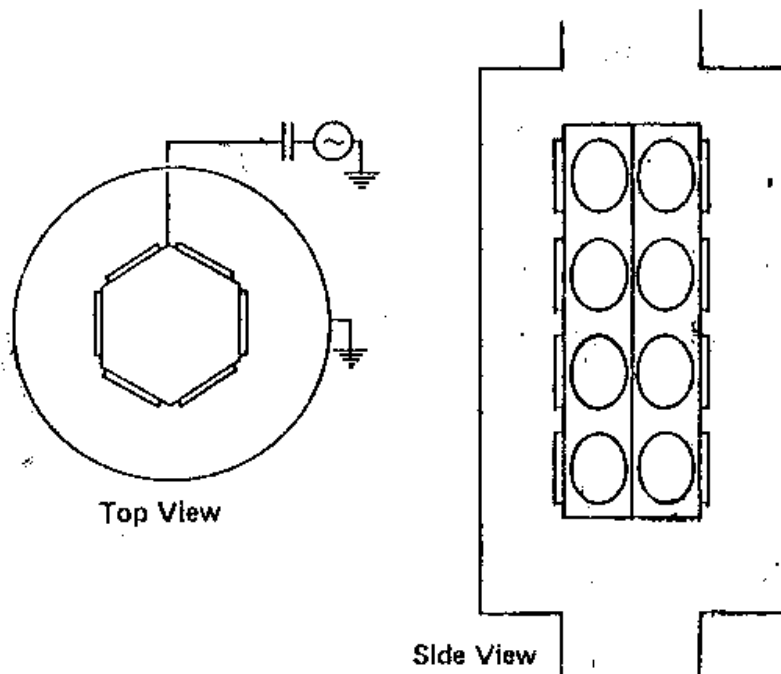
(2) RIE Reactors

☐ Planar Reactors



☐ Hexode Etcher

RIE (Cylindrical or Hexagonal Geometry) "HEXODE"

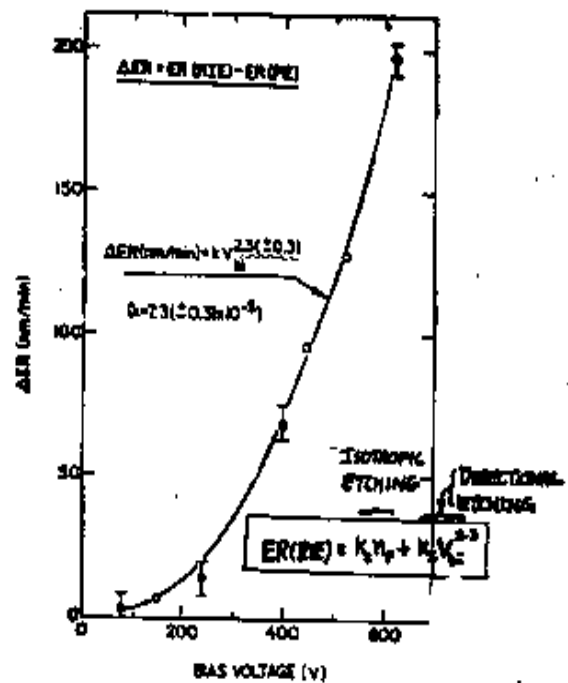
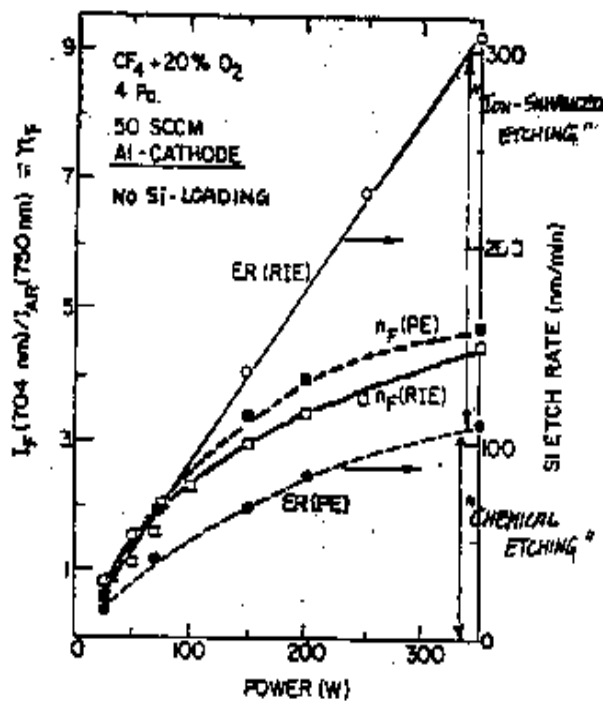


7. Process Issues

(1) Electrode power가 에칭 속도에 미치는 영향

- ☐ rf power dependence of Si etch rate and N_f
- Sputtering Rate = sputtering yield x [+] ion flux

$$= \propto V \times \propto V^{3/2} = K_1 V^{5/2}$$



(2) Loading Effects

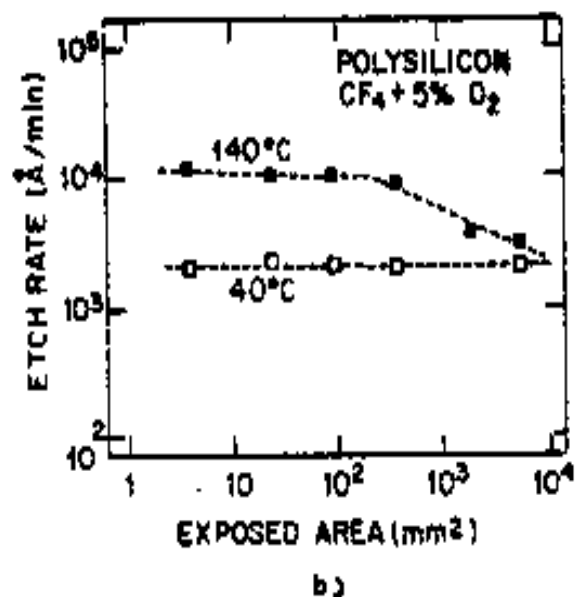
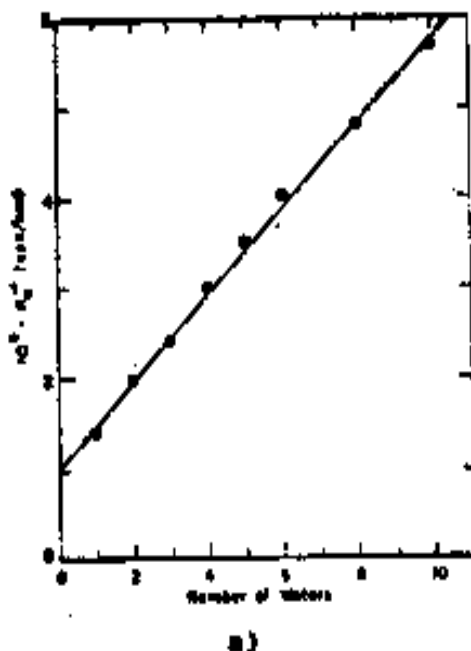
- Chamber 내에 있는 에칭 가스는 etching reaction, recombination, pumping out의 3 가지 현상에 의해 소모된다

- Etching 되는 부분이 많이 노출되어 있는 영역에서는 etching reaction에 의한 에칭가스의 소모가 大 → 에칭 가스 농도 ↓ → 에칭 속도 ↓

- 온도가 낮아, 에칭 속도가 reaction rate limited인 경우: no loading effect

- Loading effect를 감소할 수 있는 방법:

- large gas flow
- etching되는 것과 똑같은 물질로 전극 제작
- ion bombardment에 의해 에칭속도가 제어되도록 함



[3] Heating Effect

☐ **Heating의 발생 원인**

- **convection/radiation을 통한 heat conduction**
- **exothermic chemical reaction**
- **입사하는 입자들의 운동에너지**
- **입사하는 분자들의 분해 에너지**
- **여기된 radical들의 방출 에너지**
- **rf inductive heating**

☐ **rf inductive heating**

- **ac magnetic field에 의한 “eddy current” 발생**
- **보통 sample의 두께가 13.5MHz의 skin depth (100 μ m) 보다 월등히 작음으로 eddy current는 박막 전체에 발생**

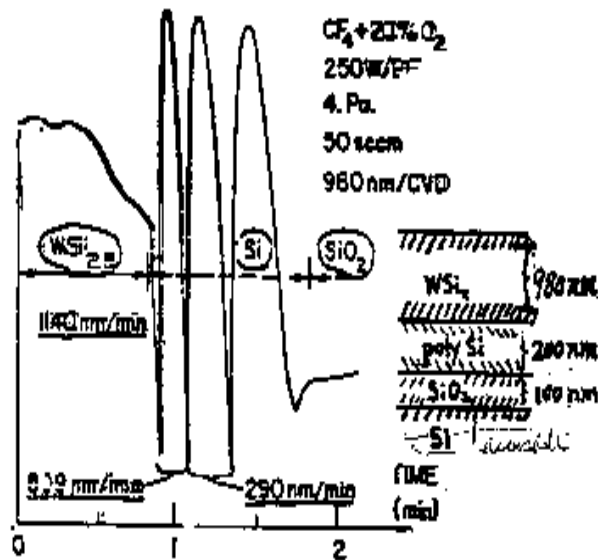
$$\text{ohmic loss/area} = \frac{1}{2}t\rho I_e^2$$

$$= \frac{1}{2}t\rho \left(-\sigma \frac{dA}{dt} \right)^2 = \frac{1}{2}t\sigma \left(\frac{dA}{dt} \right)^2$$

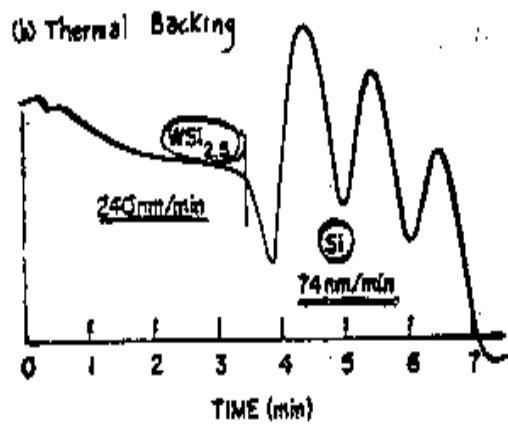
t: film 두께, I_e : eddy current, A: magnetic field

□ Thermal backing/ no thermal backing 비교

⇒ No thermal backing

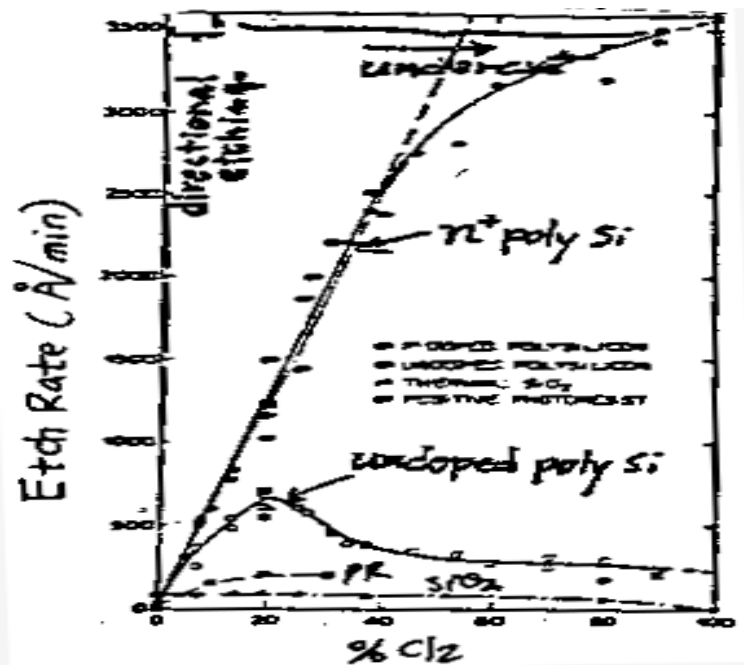


(b) Thermal Backing



(4) Doping Effects

- ER of n^+ Si > ER of intrinsic Si > ER of p^+ Si
- ER of Si $\propto e^-$ concentration



□ Space charge model

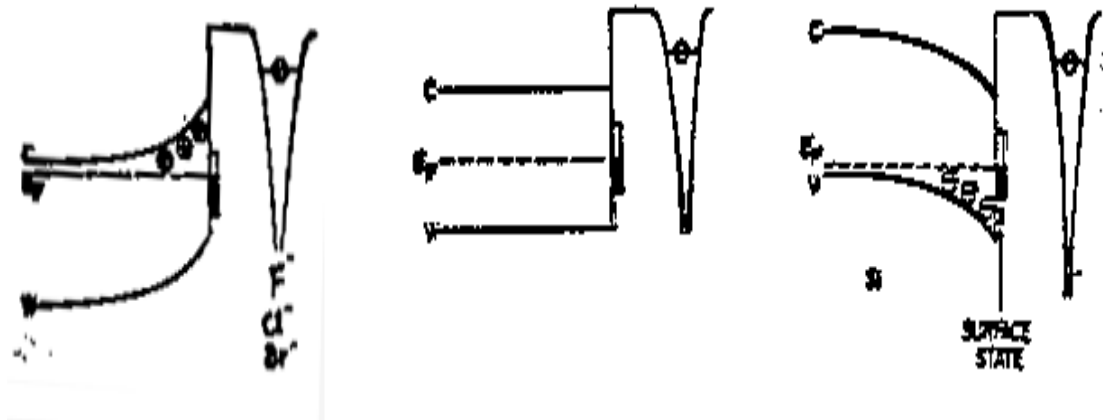
- Si 표면에 흡착된 할로겐 원자(F, Cl, Br)들은 전자와의 강한 유착력으로 인하여 (-)전하를 띄고 있다
- n^+ Si의 표면 공핍층:
[+]전하 대전 → 에칭 속도 증가

intrinsic Si의 표면:

대전 전하 없음 → 에칭속도 변화 없음

p^+ Si의 표면 공핍층:

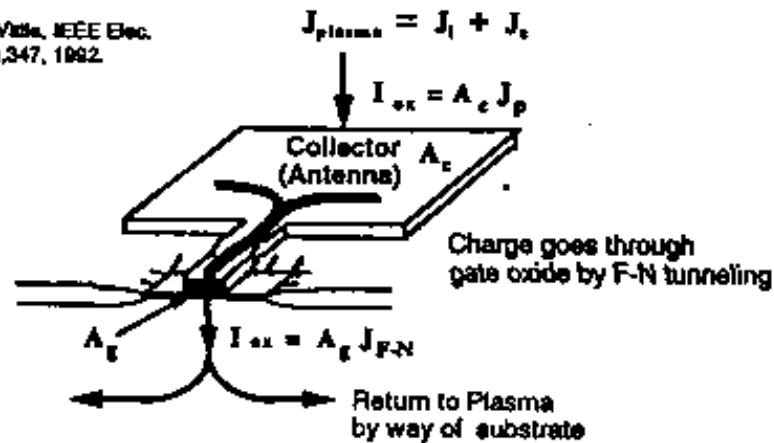
[-]전하 대전 → 에칭 속도 감소



(5) Plasma Charging Damage (Antenna Effect)

Area Antenna Effect

B. Fang, J.P. McVittie, IEEE Elec.
Dev. Lett., 13(8),347, 1992.



If the oxide current is uniform,

$$J_{\text{F-N}} = \frac{I_{\text{ex}}}{A_g} = \frac{A_c}{A_g} J_p$$

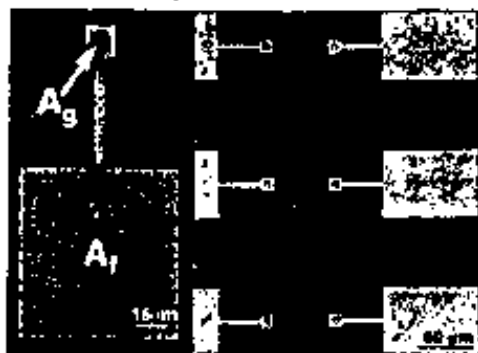
$$\frac{A_c}{A_g} = \text{Area Antenna Ratio}$$

Stanford University

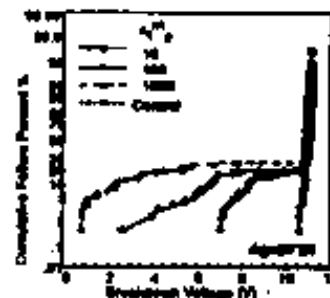
J.P. McVittie

Example of Area Antenna Damage

Top View



After 30 s exposure to
nonuniform O_2 plasma



Fang, McCarthy, McVittie, ECS
Proc. Vol. 91-11,472, 1991.