

# 플라즈마 利用技術( I )

黃 琪 雄  
(서울大 工大 教授)

■ 차 례 ■

- 1. 머릿말
- 2. Plasma Etching의 이론
- 3. 맺는 말  
참고문헌

## ① 머릿말

우주 물질의 대부분이 플라즈마 상태에 있지만 지구상에서는 천둥이 칠 때 생기는 방전이나 극지방에서 볼 수 있는 오로라와 같이 극히 일부분이 자연 상태의 플라즈마로 존재한다. 지금까지 플라즈마의 이용은 그것이 내는 밝은 빛을 이용한 조명이나, 높은 열을 이용한 용접이나 절단이 고작이었으나 최근에 들어 초고온, 고밀도 플라즈마를 이용한 핵융합 에너지 연구나 Free Electron Laser나 Gyrotron과 같이 새로운 Radiation Source로써 종래의 Source가 만들지 못하던 주파수 영역이나 또 아주 높은 출력을 내는데 이용이 되고 있으며, Glow Discharge에서 생기는 저온 Plasma를 이용한 Plasma Etching, PECVD(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition), Plasma Ashing, Sputtering 등은 VLSI의 제조에 필요불가결한 공정의 일부분이 되고 있다. 앞으로 수회에 걸쳐 본 技術 解説란을 통하여 이들 Plasma의 이용 기술을 소개하고자 하며 본회에서는 그중에서 Plasma Etching에 대해서 그 원리와 기술상의 특징을 살펴보고자 한다.

## ② Plasma Etching의 이론

반도체를 이용한 소자나 집적회로의 제작 과정을 살펴보면 최초의 설계와 이의 검증이 끝나면 이 설계를 실리콘 기판 위에 형상화하는 공정으로 이어

지며, 현재 Photo Lithography 기술을 이용하고 있다. 이것은 그림 1 과 같이 먼저 기판을 준비하고 여기에 Photo Resist를 입힌 후 Mask의 Pattern을 옮기고, Photo Resist를 현상한 후 기판을 蝕刻하는 과정을 이야기 하며, 蝕刻 대상이 되는 물질은 Si, Poly-Si, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 등과 Al, W과 같은 금속이 있다. 蝕刻을 하기 위해 종래에는 주로 Chemical Acid가 사용이 되어 왔으며, Wet Etching이라고 호칭되어졌다. Wet Etching이 갖는 특성 중의 하나는 蝕刻이 방향성이 없이 Isotropic하다는 것이며 蝕刻이 끝난 후 그림 2의 (b)와 같은 단면을 보여 줄 것

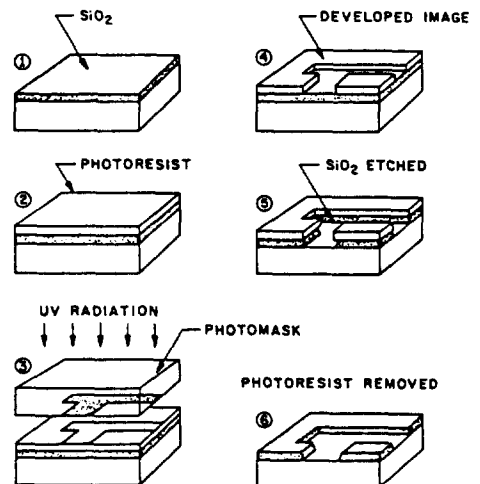


그림 1. Details of the lithographic process. (Ref. 1)

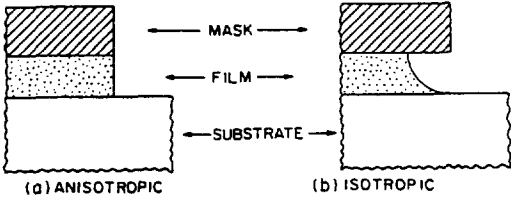


그림 2. Ideal etch profile for (a) fully anisotropic and (b) isotropic etching. (Ref. 2)

이때, 이것이 갖는 단점은 蝕刻이 Mask의 밑으로 진행이 되어 들어간다는 점이다. 회로의 집적도가 낮은 경우에는 이 Undercutting이 별로 문제가 되지 않으나 회로의 선폭이 2~3 μm가 요구되는 VLSI에서는 만일 깊이가 1 μm가 요구된다면 Wet Etching에 의해서는 형상을 蝕刻해 낼 수가 없게된다. 반면에 Glow Discharge에서 생기는 저온 Plasma를 이용한 Dry Etching은 蝕刻이 非等方性을 갖고 있으며 完全한 非等方蝕刻인 경우 그림 2의 (a)와 같은 단면을 보여줄 것이며, Mask에서 Photo Resist로 Pattern만 옮겨질 수 있다면 이론적으로 얼마든지 작은 Pattern도 형성화할 수 있다. Plasma를 이용한 Dry Etching은 이 외에도 Wet Etching에 비해서 Chemical의 소모량이 적기 때문에 가격이 싸고, 위험한 酸을 취급하지 않고 진공을 이용하기 때문에 환경오염의 문제가 적고, 또 공정의 自動化가 가능하기 때문에 적은 人力이 요구되고, 또 Human Error를 줄일 수 있으며 위험한 공정으로부터 사람을 보호할 수 있는 장점이 있어서 蝕刻工程이 점차 乾式化 해가는 추세에 있다.

**a. 乾式 蝕刻의 原理**

乾式 蝕刻을 하기 위한 장치는 그림 3에서 보는 바와 같이 Glow Discharge가 일어나는 Chamber와, 전극, 가스 도입장치, RF 전원 및 진공 펌프로 이루어진다. Plasma는 대개 전극 사이에 RF(13.56MHz)를 걸어서 형성시키나, 이보다 낮은 주파수나 μ-wave를 이용하기로 하고, 때로는 UV나 Laser를 이용하기로 한다.

Plasma와 RF에너지의 결합은 그림 4에서와 같이 유도 결합과 용량결합이 있을 수 있으며, 또한 용량결합에서는 被蝕刻物을 접지된 전극 위에 놓거나 RF가 가해지는 전극 위에 놓을 수 있다.

실리콘 기판이나 SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 薄膜을 CF<sub>4</sub> 가스를 이용해서 蝕刻하는 경우를 고찰하면 아래와 같다. 먼저 RF에 의해서 가속된 전자가 CF<sub>4</sub> 분자와 충돌하여 이온화 시키고 불소 Radical을 만든다. 다음 이 Radical이 실리콘과 반응하여 Volatile한 SiF<sub>4</sub>가 만

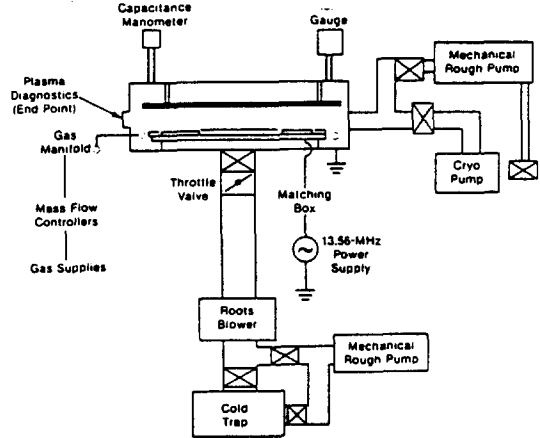


그림 3. Typical RIE system. (Ref. 3)

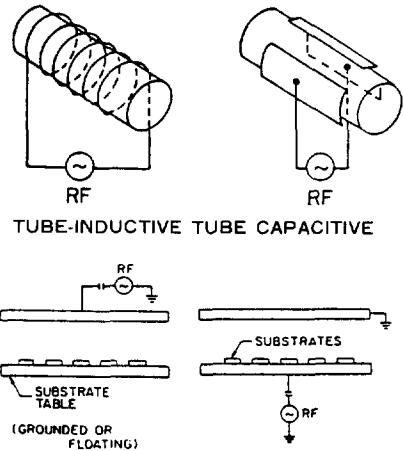
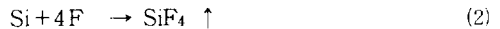
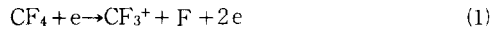


그림 4. Schematic drawing of inductively and capacitively coupled reactors and electrode arrangement for a flat bed system. (Ref. 4)

들어지고 이것이 진공 Pump를 통하여 Chamber로부터 배기된다.



여기서 중요한 것은 최종 생성물이 휘발성이 강해서 반응 즉시 진공 펌프로 배기할 수가 있어야 하며, 被蝕刻物의 종류에 따라 기체로 날아갈 수 있는 최종 反應物質이 다르기 때문에 일반적으로 反應가스로 사용되는 가스의 종류와 최종 생성 물질은 표 1과 같다.

위의 반응은 기판이나 膜을 구성하는 물질과 반응할 수 있는 기체의 Radical이 흡착이 되어서 일어나는 화학반응이며 따라서 蝕刻은 第方性을 갖고, 혐의

표 1. 蝕刻에 사용되는 가스와 생성물

Etching Material	Etchant	Product
Si, SiO <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	CF <sub>4</sub> , SF <sub>6</sub> , NF <sub>3</sub>	SiF <sub>4</sub>
Al	CCl <sub>4</sub> , Cl <sub>2</sub> , BCl <sub>3</sub>	AlCl <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> Cl <sub>6</sub>
GaAs, InP	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> , Cl <sub>2</sub>	GaCl <sub>3</sub> , AsCl <sub>3</sub>
Refractory Metal /Silicides	CF <sub>4</sub> , CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	WF <sub>6</sub>
Organic Solids (Photo Resist)	O <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> + CF <sub>4</sub>	CO, CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O HF

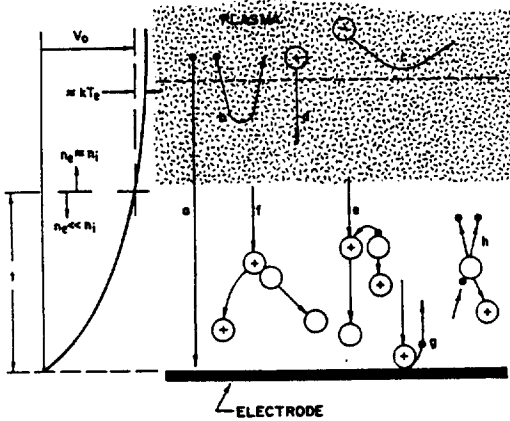


그림 5. Events in the sheath: (a) fast electron escape (b) slow electron reflection (c) negative ion reflection (d) ion injection (e) ion-neutral charge exchange (f) neutral scattering (g) secondary electron emission (h) electron-impact ionization  $V_0$  is sheath potential. (Ref. 3)

Plasma Etching이라고 불리어진다. 반면에 Plasma 내부에 존재하는 이온이 식각 반응에 수반이 되면 식각은 非等方性을 띄게 되며 통상 RIE(Reactive Ion Etching)으로 불리어진다. 被蝕刻物 위에 떨어지는 이온의 에너지는 플라즈마와 被蝕刻物이 없혀있는 전극 사이에 존재하는 電場에 의해서 결정되어지며 이것의 전위차는 통상 수십에서 수백 볼트에 이른다. 이 電場이 생기는 이유는 그림5에서와 같이 Plasma와 접지된 벽사이에는 Sheath라고 불리우는 전기적으로 (+)인 영역이 존재하며, 전자와 이온의 열운동의 차에 의한 공간전하 불균형 때문에 전위차가 생기게 되고 여기에 생기는 전계에 의해 Plasma가 Self-Confine되며 Plasma가 갖는 Plasma의 전위

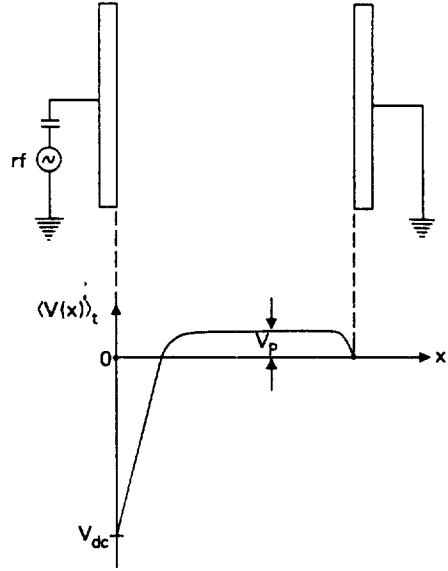


그림 6. Approximate time-averaged potential versus distance plot for a capacitively coupled planar RF glow discharge system. (Ref. 6)

$V_p$ 와 벽이 갖는 Floating전위  $V_f$  사이의 차는 아래의 식으로 주어진다<sup>5)</sup>

$$V_p - V_f = \frac{kT_e}{2e} \ln \left( \frac{m_i}{2.3 m_e} \right) \quad (3)$$

여기서  $e$ ,  $T_e$ ,  $m_e$ 는 전자의 전하, 온도, 질량이며  $m_i$ 는 이온의 질량이고  $k$ 는 Boltzmann 상수를 나타낸다. 이 식에 의하면 수소 플라즈마의 경우 전자의 온도가 5eV이면  $V_p$ 는 15V 정도가 된다.

RF가 가해진 전극의 전위는 RF의 극과 극 전위 사이를 주어진 주파수로 진동하며 이 전위의 시간평균치는 그림 6에서와 같이 상당한 負의 값을 갖으며 "Self-Bias Voltage"로 불리어지고 그 값은  $-(V_{RF} - V_p)$ 가 된다. 여기서  $V_{RF}$ 는 RF의 최대 전위를 나타내고 통상 이 값은  $V_p$ 보다 훨씬크다. Self-Bias Voltage가 負의 값을 갖는 이유로서는 전체적으로 電氣的인 中性으로 되려는 Plasma의 고유한 성질과, 전자와 이온의 mobility차에 의해서 생기게 된다.

蝕刻이 非等方性으로 수직하게 일어나기 위해서는 이온이 높은 에너지를 갖어야 될 뿐 아니라 被蝕刻物에 수직으로 떨어져야 될 필요성도 있으며 따라서 이온이 Plasma Sheath에서 가속되는 중에 중성 분자나 다른 이온과의 충돌을 배제해 줄 필요가 있고, 이를 위해 기체의 압력을 통상 10 mtorr 정

표 2. Plasma etching과 RIE의 특징

특징	구분	Plasma Etching	RIE
등방성		Isotropic	Anisotropic
압력		High	Low
전극		Large Electrode	Small Electrode
피식각물위치		Grounded Electrode	Powered Electrode

도로 낮게 해준다.

이외에 전극의 크기를 달리하면 각 전극에 나타나는 전위차의 비는

$$\frac{V_B}{V_A} = \left(\frac{S_A}{S_B}\right)^n \quad (4)$$

의 형태로 주어지며, 여기서  $S_A, S_B$ 는 전극 A, B의 면적을 나타내고 통상  $n$ 은 4~5의 값을 갖는다.

이상의 사실을 종합하면 Dry Etching은 Plasma Etching과 Reactive Ion Etching으로 나눌 수 있으며 각각의 특징은 표 2에서와 같이 주어진다.

**b. 蝕刻에 중요한 변수**

被蝕刻物의 蝕刻速度, 等方性, Photo Resist 와의 選擇度 등은 여러가지 변수에 따라서 바뀌며 그 중 중요한 변수로는 압력, 가스의 유입 및 배출속도, RF의 Power, RF의 주파수, Reactor Geometry, Pumping Speed, 전극의 재질, 기판의 온도, 두가지 이상의 기체를 사용할 경우 혼합 비율 등이 있으며 변수의 수가 많음으로 인해서 최적의 변수치들을 찾는 것은 대개 실험적인 방법을 통해서 얻어지고 있다.

Plasma 내의 반응하는 성분의 상당한 부분이 반응을 통해서 소비가 되면 그림 7과 같이 蝕刻物의 蝕刻速度는 반응로 속에 존재하는 基板의 數 혹은 面積에 영향을 받게 되며 이것을 Loading 효과라고 한다.

Plasma 내의 전자와 이온의 에너지 분포는 사용되는 RF의 주파수와 기체의 압력에 의해 영향을 받는다. 보통 사용되어지는 주파수와 압력의 범위에서 (0.05-30MHz, 0.001-1 Torr) 주파수와 압력이 감소할 수록 기판 위에 떨어지는 이온의 Flux와 에너지는 증가한다.

반면에 RF의 Power를 증가시키면 이온과 Radical의 밀도와 이온의 에너지는 증가하나, 이온의 밀도는 높은 Power에서는 포화가 된다. 일반적으로 Power Density가 낮으면 (<0.5W/cm<sup>2</sup>) Power를 높일 수록 蝕刻率도 증가하게되나 매우 높은 Power에서는 기판의 가열에 의한 온도 상승이라던지 격렬한 이온

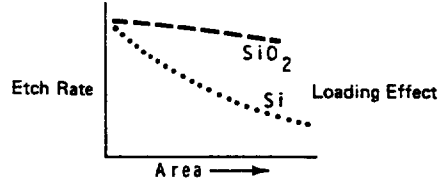


그림 7. Loading effect for Si and SiO<sub>2</sub> etching. (Ref. 5)

의 충돌에 의한 기판의 손상과 Mask의 蠶食이 일어나게 되므로 주의해야 한다.

기판의 온도는 蝕刻속도, 선택도, 등방성 등에 영향을 미친다. 일반적으로 蝕刻率은 기판의 온도 T에 따라 Arrhenius형태의 의존도를 보여준다.

$$\text{Etch rate} \propto \exp(-E_a/kT) \quad (5)$$

여기서  $E_a$ 는 기판의 물성에 따라 변하는 Effective Activation에너지를 나타내며 따라서 다른 물질과의 선택도도 온도에 따라 지수적으로 변한다.

반응 Chamber 속으로 넣어주는 가스의 유량은 식각반응을 일으키는 Etchant가 Chamber 내에서 Plasma 상태로 분해가 되어 식각 반응을 일으키거나 진공펌프에 의한 배기 때문에 고갈이 되지 않도록 충분히 흘러 주어야 하며, 반면에 不飽和된 混成物에 의한 高分子의 結합이 일어나지 않도록 조절이 되어야 한다. 가스가 Chamber 속으로 도입되어 Plasma 속에서 분해가 되면서 생기는 각각의 Radical들과 이온의 체류 시간에 의해서 가스의 화학적 조성이 결정된다. 가스의 유량은 압력과 함께 다음의 식에 의해서 Radical들의 체류 시간에 영향을 미친다.

$$V \frac{dP}{dt} = Q - SP \quad (6)$$

V : Volume

P : Pressure

Q : Gas flow rate

S : Pump speed

위의 식의 해는 다음과 같이 얻어진다.

$$P(t) = \frac{Q}{S} + \left(P_0 - \frac{Q}{S}\right)e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (7)$$

여기서  $\tau = V/S = PV/Q$ 이며 체류시간 이라고 불리어진다. 만일 가스 유입율이 높아서 체류시간이 화학반응시간 보다 짧으면 Plasma 내의 Active Species는 도입가스의 조성에 의해서 결정이 되며, 반면에 가스 유입율과 식각 반응이 느려서 체류시간이 화학반응시간보다 길면 반응조성은 균일하고,

도입가스의 분자 구성비에 관계없이 기본적인 Stoichiometry에 의해서 결정이 된다. 기체-고체 반응, 고분자화, 식각된 물질의 재흡착과 같은 것은 반응 Chamber 내에서 위치에 따른 식각률의 변화와 높은 조성비 변화를 초래하기 때문에 빠른 식각과 긴 체류시간은 되도록 피해야 한다.

c. 첨가 가스의 영향

실리콘과 그것의 Compound를 CF<sub>4</sub> 가스를 이용하여 식각을 할 때 다른 가스를 첨가하면 그림 8 과같이 식각의 속도나 선택도가 달라진다. 산소 첨가의 경우는 산소와 탄소의 결합에 의해 CO와 CO<sub>2</sub>가 생기면서 탄소원자가 불소원자와 재결합 하는 것을 막고 불소원자가 쉽게 식각에 참여할 수 있음으로 인해서 생기게 되며, Si의 식각속도가 SiO<sub>2</sub>보다 더 크게 영향을 받는 것은 SiO<sub>2</sub>의 경우는 표면에 흡착된 탄소원자가 SiO<sub>2</sub>격자 속에 있는 산소와 결합함으로써 불소원자와 재결합하여 CF<sub>4</sub>로 재생되는 것을 방지하기 때문에 일어난다.

수소가스 첨가의 경우는 불소원자와 결합하여 HF를 만듦으로 인해서 식각속도가 달라지게 되며 Si와 SiO<sub>2</sub>간의 선택도는 산소가스 첨가의 경우와 같은 이유에 의해서 설명이 되어진다<sup>7)</sup>.

때로는 Ar이나 He같은 불활성 가스도 사용되며 진동이나 수축과 같은 Plasma 자체의 불안정성을 억제하는 효과를 가진다. 또 Sheath 전위의 변화나 이온의 충격에 의해 蝕刻의 非等方性에 영향을 주기도 한다.

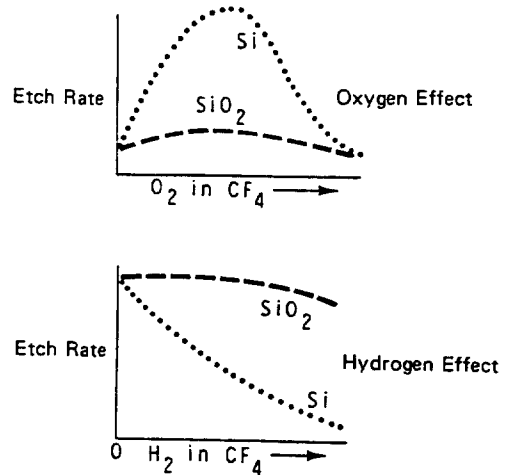


그림 8. Effects of additive gas on etch rate. (Ref. 5)

표 3. Plasma의 진단기술

Technique	Equipment	Measurement	Plasma parameters monitored
Material gain/loss	Quartz crystal microbalance	Weight gain/loss	Deposition rate/etch rate, film density
Emission spectroscopy	Monochromator-photodetector	Emission spectrum	Gas composition, gas temperature
Chemiluminescence	Monochromator-photodetector	Emission spectrum downstream from discharge	Gas composition
Laser-induced fluorescence	Excitation laser, monochromator-photodetector	Laser-induced emission spectrum	Gas composition, density of emitting species, gas temperature
Mass spectroscopy	Quadrupole, mass spectrometer	Mass-resolved fragmentation spectrum	Gas composition
Langmuir probe	Probe, voltage source electrometer	Current versus voltage	Electron density, ion density, electron temperature
Beam measurements	Ion-beam source, quartz microbalance, quadrupole mass spectrometer, auger spectrometer, monochromator-photodetector	Weight gain/loss, mass spectrum, ion-beam energy, angle of incidence	Etch rate, reactant composition, product composition, surface films, activation energies

**d. Doping 효과**

Bromine이나 Chlorine을 포함하는 Plasma 내에서 실리콘의 蝕刻率은 불순물의 Doping 정도에 많은 영향을 받는다. n-형으로 Doping된 단결정 실리콘이나 폴리 실리콘은 Doping 정도에 비례하여 Doping되지 않은 실리콘보다 식각속도가 빠르다. 이것은 n-형으로 Doping되면 Fermi준위가 올라가고 따라서 실리콘으로부터 격자에 자리잡은 Bromine이나 Chlorine 원자로 전자의 이동이 쉬워지기 때문에 일어나는 것으로 설명이 된다.

**e. Plasma 진단 및 最終點 檢出**

蝕刻의 速度, 等方性, 다른 物質과의 選擇度 등은 Plasma의 밀도, 온도, 가스의 조성에 따라 달라지며 또 Chamber내에서의 반응과정과 반응 물질을 알 필요가 있다. 이를 위해서 여러가지 방법을 사용할 수 있으며 필요한 장비와, 측정되는 양과 Plasma 변수를 정리하면 표 3 과 같다. 또한 이들을 관측하면 蝕刻이 끝나는 순간을 알아낼 수 있으며 이를 이용하면 공정을 자동화 할 수 있다. 대표적으로 이용되는 방법은 Optical Emission, Mass Spectroscopy, Pressure, Impedance, Laser Interferometer 등이 있다.

**㉓ 맺는말**

이상 살펴본 Glow Discharge에서 생기는 저온 Plasma를 이용한 Dry Etching 기술은 VLSI의 集積도가

높아지면서 매우 중요한 기술이 되고 있으며, 앞으로 1 mega 이상의 VLSI에서는 Trench라던지 Trilayer 등을 이용해야 하는 신기술의 개발이 필요하며 따라서 이 분야에서 많은 연구가 필요하고, 방전 분야에 종사하는 인력이 쉽게 접근할 수 있는 분야이므로 많이 관심을 갖고 연구가 활발해지길 바란다.

**참고문헌**

- 1) W.C. Till and J.T. Luxon, *Integrated Circuits: Materials, Devices, and Fabrication*, Prentice - Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1982.
- 2) S.M. Sze, *VLSI Technology*, McGraw Hill Book Co, 1983.
- 3) N.G. Einspruch and D.M. Brown, *VLSI Electronics, Vol. 8, Plasma Processing for VLSI*, Academic Press, 1984.
- 4) J.L. Vossen, *Glow Discharge Phenomena in Plasma Etching and Plasma Deposition*, J. of Electrochemical Soc.: Solid-State Science and Technology, 319, 126 (1979).
- 5) B. Chapman, *Glow Discharge Process*, John Wiley & sons, 1980.
- 6) J.W. Coburn, *Plasma Etching and Reactive Ion Etching*, AVS Monography Series, American Vacuum Society, 1982.
- 7) J.W. Coburn, *J. of Appl. Phys*, 50, 5210 (1979).

謹

吊

張世勳 監事の 逝去를 眞心으로 哀悼하고  
삼가 故人의 冥福을 빕니다.

大韓電氣學會 任·職員一同