

探針法에 의한 CF_4 가스 플라즈마 諸量의 測定과 에칭 특성

(Characteristics of Plasma Etching and Plasma Diagnostics of CF_4 Gas with Electric Probe)

成 英 權*, 申 東 烈**, 崔 福 吉*, 權 光 虎*

(Yung-Kwon Sung, Dong-Ryul Shin, Bok-Gil Choi and Kwang-Ho Kwon)

要 約

본 연구에서는 RF방전 플라즈마내에 探針(electric probe)에 의한 플라즈마 諸量의 測定방법을 개선 확립하였으며 그 방법으로서 CF_4 에칭가스의 플라즈마의 諸量들을 측정하여 그 結果와 Si웨이퍼 에칭과의 관계를 논의하였으며, 동시에 探針法の 응용가능성을 제시하였다.

Abstract

In this paper, the measurement of RF discharge plasma parameters is studied both analytically and experimentally by the electric probe method. In the measurement using an electric probe, we measure the parameters of plasma in CF_4 etching gas and discuss the relations of the results and Si wafer etching. Also, we show that the electric probe method is attractive for various applications.

I. 序 論

最近 I, C LSI 및 VLSI 등 半導體 프로세스의 乾式 에칭(dry etching) 技術중에서 실용화가 앞서고 있는 플라즈마 에칭은^{1),2),3)} 高周波電界(RF power)의 인가에 의해 발생하는 글로우放電(glow discharge) 플라즈마를 使用하여 플라즈마에 포함되는 原子 혹은 活性種(radical) 등을 선택되어진 基板表面에 吸收擴散시켜서 화학반응으로 揮發性氣體를 만들어서 表面을 에칭하게 된다.

그러나 장점이 많은 플라즈마 에칭 기술은 mass spectroscopic 연구⁴⁾ optical 연구⁵⁾ 및 에칭 프로세스의 kinetic 연구⁶⁾ 등 많은 선행연구에도 불구하고 현재까지

도 플라즈마 에칭 반응과정의 機構가 명확치 않아 半經驗적으로 시행되고 있을 뿐만 아니라 한편으로는 피가공 재료간에서 에칭중 발생하는 기관의 손상 또는 오염등의 우려와 에칭속도 선택성의 불충분등 문제점이 내포되어 있기 때문에 아직까지 해결되어야 할 부분이 많이 있다고 하겠다. 이러한 문제들을 해결하기 위해서는 많은 에칭 파라미터(가스의 造成 및 壓力, RF power, 가스流量, 溫度 등)들을 실험적으로 수집하여 最適變化를 決定해야 함과 동시에 글로우 放電 플라즈마 電位 등에 대해서도 명확히 파악하여 플라즈마 에칭의 반응과정을 규명해야 하므로 에칭시 플라즈마 諸量에 대해서 직접 測定할 수 있어야 한다.

플라즈마 諸量의 測定에 있어서는 예전부터 使用되어 온 Langmuir probe 방법이 있으며 이 방법은 실제의 플라즈마 諸量 계산상 복잡함과 測定上 한계가 있음이 알려져 있다.

그러므로 본 연구에서는 RF放電 플라즈마내에 探針

*正會員, 高麗大學校 電氣工學科
(Dept. of Electrical Eng., Korea Univ.)

**正會員, 動力資源研究所
接受日字: 1986年 1月 23日

(electric probe)에 의한 프라즈마 諸量의 測定方法을 개선하고 本 方法으로 CF 에칭가스의 프라즈마 諸量을 測定하여 Si웨이퍼 에칭과의 관계를 논의하였으며, 동시에 本 探針法의 응용 가능성을 제시하였다.

II. 프라즈마 내의 探針理論

探針法(Langmuir's electric probe사용)은 프라즈마 內에 삽입된 探針의 電壓-電流特性을 測定하여 프라즈마 諸量을 계산에 의해 구하는 방법이다.^{1,2)}

探針의 電位를 外部에서 변화시킴으로써 프라즈마 內의 荷電粒子에 대해 減速 또는 加速電界가 생기게되며, 이에 따라 探針에 도달하는 荷電粒子에 의한 電流가 변화하게 되어 프라즈마내 探針에서의 電壓-電流特性을 구할 수 있게 된다.

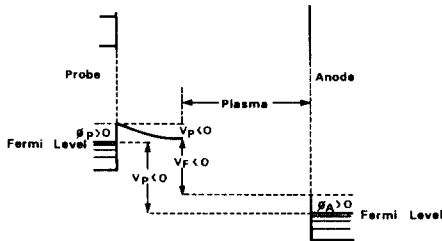


그림 1. 탐침면과 양극간의 전위차.
Fig. 1. Potential energy level diagram between an electric probe and an anode.

그림 1에서와 같이 프라즈마와 探針間에 발생하는 電位差 V_F 는 탐침을 형성하는 금속의 표면에 존재하는 接觸電位差 ϕ_p 와 探針表面과 프라즈마 内部間에 발생하는 電位差 V_p 의 합으로 되므로

$$-V_F + \phi_p = \phi_a - V_F - V_p \tag{1}$$

가 된다. 여기서 V_p 는 V_F 에서 본 探針의 電位임. 양극과 탐침의 일함수가 같다고 하면

$$V_p = V_F - V_F \tag{2}$$

가 된다:

한편 그림 2에서와 같이 프라즈마 내의 探針의 외부 回路에서 電壓 V 를 인가할때, 프라즈마 내의 荷電粒子의 電荷量을 g 라 하고, 探針表面에 수직인 荷電粒子의 速度成分을 v 라 하면 荷電粒子의 운동에너지 $(1/2mv^2)$ 가 減速電位 $(-qV)$ 보다 큰 粒子만 탐침에 도달하게 된다. 따라서 탐침표면에 단위면적당 1초간에 떨어지는 電子와 이온의 수를 각각 Γ_e, Γ_i 로 표시하고 電子, 이온의 속도는 볼츠만 분포에 따른다고 보면

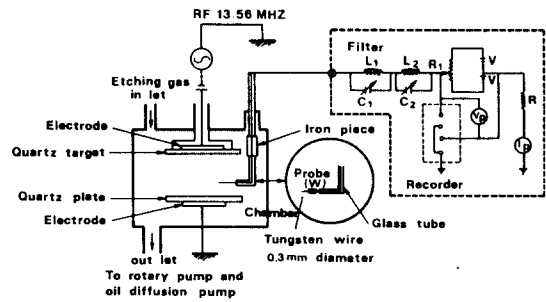


그림 2. 프라즈마 에칭장치와 탐침회로
Fig. 2. Schematic diagram of plasma etching apparatus and a measuring circuit with electric probe.

$$\Gamma_e = \frac{1}{4} n \langle v_e \rangle$$

$$\Gamma_i = \frac{1}{4} n \langle v_i \rangle \tag{3}$$

가 된다. 여기서 n 는 하전입자의 밀도이고 $\langle v_e \rangle$ 와 $\langle v_i \rangle$ 는 각각 電子, 이온의 속도이다.

그러므로 탐침에 흐르는 電流 I_p 는 다음과 같이 된다.

$$I_p = \frac{1}{4} \cdot S_p \cdot e \cdot n (\langle v_e \rangle - \langle v_i \rangle) \tag{4}$$

여기서 S_p 는 탐침의 표면적이다.

만약 粒子가 電子라 하고 $V_p > 0$ 인 경우에는 電子는 加速電界에 의해 모두 探針에 도달하게 되어 결국 飽和電流 I_{ps} 로 된다. 즉

$$I_p = S_p \cdot e \cdot n \left(\frac{k T_e}{2\pi m_e} \right)^{1/2} (= I_{ps}) \tag{5}$$

여기서 e 는 電子의 電荷量,

m_e 는 電子의 質量,

T_e 는 電子의 溫度이다.

한편 $V_p < 0$ 인 경우는 이온에 대해서는 加速電界로 作用하게 되므로 速度分布를 나타내는 電子가운데 일부만 V_p 逆電界를 극복해서 探針에 도달하는 계산이 되므로 探針電流 I_p 는

$$I_p = I_{ps} \cdot \exp\left(\frac{eV_p}{kT_e}\right) \tag{6}$$

로 된다. 위 식에서 양변에 I_n 을 취하여 보면, $I_n I_p$ 와 V_p 그래프의 기울기에서 電子溫度 T_e 를 구할 수 있게 된다. 즉,

$$T_e = \frac{e}{k} \frac{1}{\text{기울기}} = 1.16 \times 10^4 \frac{1}{(\text{기울기})} \tag{7}$$

또한 I_p 와 V_p 특성곡선의 변곡점 ($V_p = 0$)에서 V_F 와

I_{ps} 가 구하여 지며 이들과 식 (7)의 T_e 로부터 電子密度 n 은 다음과 같이 된다.

$$n = \frac{I_{ps}}{S_p \cdot e} \left(\frac{2\pi m_e}{kT_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

III. 實驗裝置 및 方法

그림 2는 본 연구에서 사용한 플라즈마 에칭 裝置와 探針回路를 나타낸 것이다. 에칭 chamber의 電極은 平行平板 Al電極으로 하고 上部電極에 13.56MHz 300W의 高周波 發振器를 접속하였다. 또한 兩電極은 電子의 表面再結合 등을 방지하여 플라즈마 상태를 보호하기 위하여 수정유리로 덮어서 絶緣하였다.

探針은 직경 0.3mm, 길이 3mm의 텅스텐 線으로 하였으며 나머지 부분은 絶緣性유리로 감쌌다. 또한 탐침은 電極의 軸방향으로 이동이 가능하도록 탐침연결선 일부분에 철편과 스프링을 설치하여 反應爐 밖에서 磁石에 의해 이동이 가능케 하였다. 또한 反應爐 內的 플라즈마에서 탐침에 흐르는 RF 전류는 測定되는 電壓-電流 特性을 왜곡시키기 때문에¹¹⁾ 탐침에 직렬로 RF電流 주파수와 같은 주파수를 갖는 LC filter 回路를 삽입하여 C를 조절하여 RF 신호의 진폭을 최소화하였다.

探針과 연결되는 측정회로는 그림 2와 같이 0~1000V의 직류전원과 전압계, electrometer (keithley 616) 및 레코더를 사용하여 探針電位 V_p 와 探針電流 I_p 를 測定하였으며 이 결과로서 플라즈마 電位, 電子溫度 및 電子密度를 구하였다.

실제 實驗에 있어서 먼저 CF_4 가스의 V_p-I_p 特性을 구하기 위하여 電極間 거리는 $d_0=15mm$ 로 하였으며 探針位置는 上部電極으로부터 10mm되게 하였다. 이때의 가스압력은 0.1Torr로 實驗하였다. 다음으로 플라즈마의 電子溫度, 電子密度 및 플라즈마 電位를 上部電極으로부터 거리의 함수로 나타내게 測定하였으며, 이때의 電極間 거리는 17mm로 하였다.

本 裝置에서 에칭시키는 試料는 $1 \times 0.4cm^2$ 크기의 Si 웨이퍼로서 比抵抗 $10 \sim 20 \Omega \cdot cm$ (100) 방향의 n형 웨이퍼를 사용하였으며 表面전체에서 약 10%가 노출되는 패턴의 마스크 (SiO_2 막 위에 OMR-83 포토레지스트)를 사용하였다. 에칭순서는 反應管을 10^{-4} Torr까지 충분히 진공하여 殘留가스를 배기시킨후 CF_4 가스를 조절기와 밸브를 통해 도입시키며 에칭 가스壓力은 0.05 Torr~1Torr 사이에서 수행하였다. 또한 試料의 에칭速度는 ellipsometer (Applied Materials Inc. AME-500) 및 SEM을 사용하여 에칭된 두께를 測定한후 계산에 의해 에칭速度를 구하였다.

IV. 實驗結果 및 考察

그림 3은 CF_4 에칭가스 플라즈마 內에 삽입된 탐침의 전압-전류특성을 나타내며 이 특성으로부터 CF_4 가스 플라즈마의 諸量을 구한 결과이다. 그림에 표시한 바와 같이 電子溫度는 $T_e=2.3 \times 10^4$ °K로서, 이온溫度 즉 CF_4 가스溫度보다 적어도 2 order정도 큰 값으로 매우 높음을 알 수 있다.

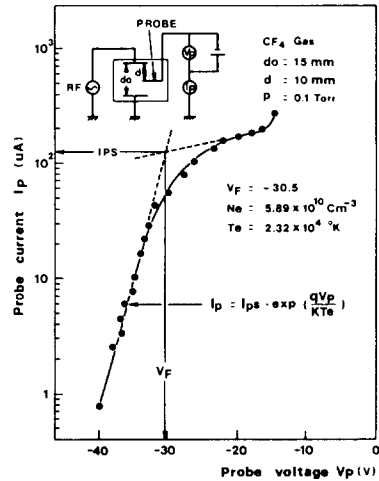


그림 3. 탐침의 전압-전류 특성

Fig. 3. I-V characteristics of the electric probe in CF_4 gas plasma.

또한 實驗적으로 플라즈마 電位와 飽和電流를 결정하기 위한 電壓-電流 特性의 변곡점 ($V_p=0$)을 찾는 데 있어서 플라즈마에서 探針에 흐르는 RF 電流로 인해 測定되는 電壓-電流特性이 왜곡된다고 報告되어 있으나,¹¹⁾ 本 實驗에서는 그림 2에서와 같이 LC filter 回路를 探針에 直列로 연결하여 사용함으로써 용이하게 변곡점을 구하여 플라즈마 電位와 飽和電流를 決定할 수 있다. 이는 反應管探針에 LC filter를 연결한 回路를 사용하면 探針法으로 플라즈마 諸量을 구하는데에 유용함을 보여준다.

그림 4는 放電中 電極間 플라즈마 電位の 分布를 나타낸 것으로서 探針位置가 陰極에서 陽極으로 향해 갈수록 약간 하강하는 경향을 보인다. 이것을 토대로 CF_4 가스의 가스압력 0.05Torr에서 0.2Torr 사이 범위에서 實驗하여 구한 電子密度를 陰極에서의 거리의 함수로 나타낸 결과를 그림 5에 보였다.

그림 5에서 알 수 있듯이 電子密度는 陰極 부근에서는 적게 나타났으며, 陰極으로부터 거리가 4mm에서는

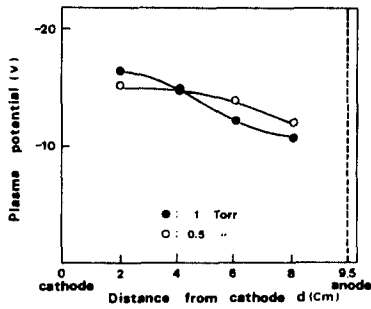


그림 4. 전극간의 플라즈마 전위분포
Fig. 4. Plasma potential distribution between the electrodes.

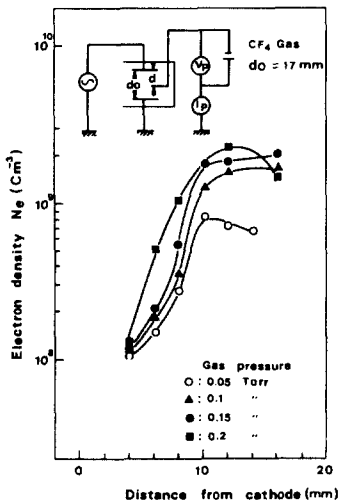


그림 5. 전극간의 플라즈마 전자밀도 분포
Fig. 5. The electron density distribution between the electrodes for various gas pressure.

電子密度가 10^4cm^{-3} 정도, 10mm에서는 電子密度가 10^3cm^{-3} 정도로 최대가 되었다가 그 이상에서는 포화내지는 감소하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 여러가지 조건하에서의 實驗에서도 볼 수 있다. 따라서 플라즈마 에칭 특성도 방전영역 내에서 위치 의존성이 있음을 예측할 수 있다. 음극 근처에서 전자밀도가 적은 것은 고주파 글로우放電에서 電極 근처에는 電子, 이온의 移動度 차이 때문에 sheath가 생기게 되어 電氣의 +인 영역이 생기게 된다. 따라서 電極 근처에서는 電子密度가 감소케 된다. 한편 플라즈마 내부쪽으로 갈수록 電子密度가 증가하는 이유는 高調波 電界에 의해 생성된 電子가 충돌전리를 반복하여 電子의 증대가 손실보다 크게 되는한 電子密度가 증가하게 되기 때문이다. (그림 5 참조)

그림 6은 앞과 같은 조건하에서 탐침위치에 대한 플라즈마 電位 및 電子溫度의 의존성을 나타낸 것으로서 電子온도와 플라즈마 電位는 탐침의 거리가 증가함에 따라 약간 감소하는 경향을 나타내나 이들중 플라즈마 電位는 반응電極의 중심부에서는 최소가 되었다가 다시 커지는 경향이 있다.

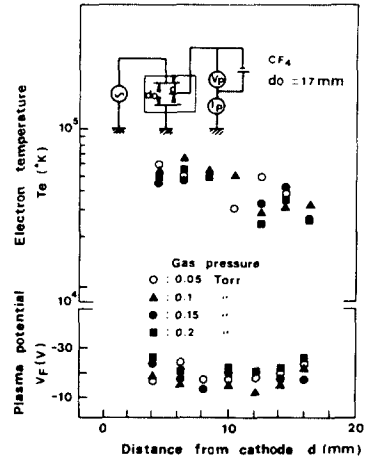


그림 6. 전극간의 전자온도 및 플라즈마 전위 분포
Fig. 6. Electron temperature and plasma potential distribution for various gas pressure between the electrodes.

일반적으로 高周波 放電에서는 그 高周波 電界의 변화에 이온이 추종하지 못하여 電極 또는 내벽 표면에서 整流作用이 생김이 알려져 있다. 그 결과 플라즈마 측은 電極 또는 내벽보다 正의 電位로 된다. 현재 널리 사용되고 있는 高周波 스퍼터링 裝置에서는 상술한 이유에 의해 타겟측의 電極은 接地電極에 대해서도 負의 電位로 되어 있으며 본 實驗에 사용한 裝置도 그림 7에 나타난 바와 같이 負의 直流電壓을 지니게 된다. 따라서 이러한 整流作用에 의해 反應管 내벽 부근에서 플라즈마 電位가 正으로 되며 약간 감소한다고 설명할 수 있으나 電極間에 負의 플라즈마 電位가 생기는 이유는 현시점에서는 명확치 않다.

그림 8은 플라즈마 諸量의 CF_4 가스 壓力 의존성의 實驗결과를 나타낸 것으로서 電子密度는 가스 壓力과 더불어 증가하나 電子溫度는 역으로 가스壓 증가에 따라 감소하는 양상을 보이며 플라즈마 電位 V_p 는 약간 하향하는 경향을 나타낸다. 그림 9는 플라즈마 諸量과 Si 웨이퍼 에칭速度와의 관계를 나타낸 것으로서 Si 웨이퍼의 에칭速度와 가스壓은 거의 비례하므로 그림 8과 비슷한 양상을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 에

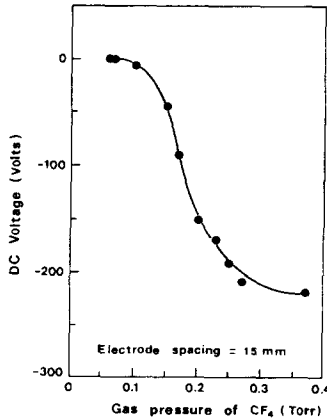


그림 7. 전극간에 발생한 직류전압의 가스압력 의존성
Fig. 7. The dependence of CF₄ gas plasma negative dc potential on the gas pressure.

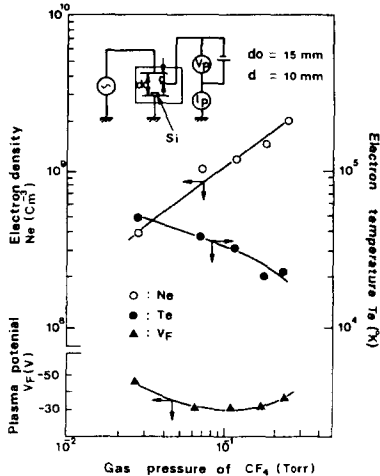


그림 8. CF₄ 가스 플라즈마 제량의 가스압력 의존성
Fig. 8. The dependence of plasma parameters on the CF₄ gas pressure.

칭 파라미터 즉 入力電力, 가스의 流量, 가스壓力 및 放電爐 상태 등에 크게 의존됨이 예측되므로 현재 이들 관계는 실험적으로 추구중이므로 이에 대한 상세한 고찰은 추후 미루기로 한다.

그림 8에서 電子溫度가 가스 壓力에 따라 감소하는 결과는 다음과 같이 설명할 수 있다. 플라즈마의 電子溫度는 電子의 운동에너지 즉 $T_e(^{\circ}K) \leftrightarrow 11600k T_e(eV)$ 로 나타남과 동시에 다른 活性種의 운동에너지에 관계하므로 가스壓力을 내리면 이들 粒子의 운동에너지가 증가하고 아울러 粒子의 平均自由行程이 크게 되는 결

과로 생각된다. 電子와 分子는 低壓力의 플라즈마에서는 완전탄성 충돌에 가깝기 때문에 電子溫度 T_e 는 다음과 같이 된다.⁽⁹⁾

$$T_e = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left(\frac{\pi}{6} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{m_i}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}} E \lambda_e \frac{e}{k} \quad (9)$$

여기서 m_e 는 電子質量,
 m_i 는 分子質量,
 E 는 電界,
 λ_e 는 電子의 平均自由行程이다.

위 식에서 電子의 平均自由行程 λ_e 는 氣壓에 반비례하기 때문에 電子溫度 T_e 도 壓力에 따라 감소하게 됨을 알 수 있다.

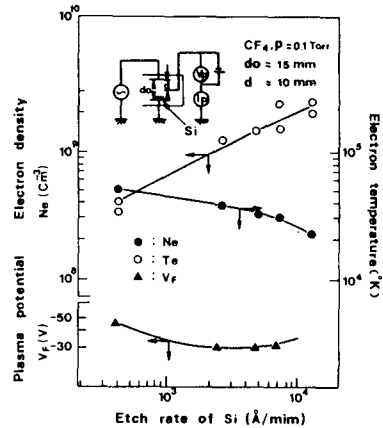


그림 9. 플라즈마 제량과 에칭 속도 의존성
Fig. 9. The relation of CF₄ gas plasma parameters and etch rate of Si.

다음으로는 그림 9에서와 같이 Si 웨이퍼 에칭속도와 플라즈마 諸量관계에서 에칭속도와 電子密度的 관계가 $I_n - I_n$ 그래프에서 거의 직선적인 경향을 나타내 電子密度와 에칭속도 사이에는 강한 相關關係를 나타냄을 알 수 있으며 이들 관계를 식으로 나타내면

$$R = 1.64 \times 10^{-14} n_e^{1.9} \quad (10)$$

(여기서 R : 에칭속도)

로 나타난다. 이와 같이 가스壓力의 增大에 따른 電子密度 증가에 의해 에칭속도가 증가하는 機構는 다음과 같이 해석할 수 있다.

플라즈마 내에서 일단 生成된 電子는 電界에 의해 加速되어 分子와의 충돌에 의해 이온 또는 活性種을 生成시키므로 전자밀도는 이들 生成된 이온이나 活性種과 비례관계로 대응된다. 따라서 電子密度的 증가는 그만큼 에칭에 기여하는 活性種의 밀도를 증가시키게

되며 그결과 에칭 속도가 증가한다. 그러므로 식(10)에 나타난 바와 같이 Si 에칭 속도가 전자밀도의 증가에 따라 증가하게 된다고 간주된다.

참고로 에칭가스도 CF₄ 가스 대신 C₂F₆ 및 C₃F₈ 가스를 사용하여 플라즈마 諸量과 Si 웨이퍼의 에칭速度를 實驗한 결과 CF₄ 가스를 사용한 결과와 별도 상이한 점이 나타나지 않았다. 이들 각각의 가스에 대해 플라즈마 諸量을 探針法에 의해 같은 가스壓에 대해 실험한 결과를 表 1에 나타냈으며 어느 가스나 가스압력이 높아짐에 따라 電子密度는 커지게 되고 역으로 電子溫度는 낮아지게 되는 결과를 얻었다.

표 1. 각 에칭가스의 플라즈마 諸量 상대비교

플라즈마 諸量	에칭가스 상대비교
電子密度, n _e	CF ₄ , C ₂ F ₆ > C ₃ F ₈
電子溫度, T _e	CF ₄ , C ₂ F ₆ < C ₃ F ₈
플라즈마電位, V _f	CF ₄ , C ₂ F ₆ > C ₃ F ₈

일반적으로 가스壓력을 낮게 하면 粒子的 운동에너지가 증가하여 이에 따라 粒子的 平均自由行程도 커지게 되므로 電子溫度는 낮아진다. 반대로 가스壓력을 높이면 플라즈마내의 電界에 의해 加速되는 電子는 分子와의 충돌회수가 증가하여 發生하는 이온이나 活性種의 密度가 증가하기 때문에 전자밀도는 높아지고 Si의 에칭 속도도 커지게 된다고 해석된다.

이상과 같이 탐침법에 의해 測定된 RF放電플라즈마 諸量과 에칭과의 관계考察에서 알 수 있듯이 탐침법에 의해 반응하고 있는 CF₄ 가스 플라즈마의 諸量, 즉 전자밀도, 전자온도 및 플라즈마電位 등을 정량적으로 測定할 수 있음과 동시에 임의의 探針위치 변동으로 플라즈마내 임의점에서의 플라즈마 諸量을 측정할 수 있었다. 또한 이러한 測定 및 解析을 바탕으로 探針法에 의해 에칭 중인 反應管內的 電子密度를 測定하면서 가스壓력을 조정하면 에칭속도를 制御하면서 Si 웨이퍼의 에칭을 재현성 좋게 시행할 수 있게 된다. 따라서 探針法은 에칭시 플라즈마 상태의 모니터 역할을 할 수 있게 된다. 실제로 複探針法을 사용하여 플라즈마 諸量의 測定과⁽¹¹⁾ 탐침포화전류가 에칭하는 물질에 의해 변화됨을 이용하여 에칭종료됨을 모니터한 결과를 報告한⁽¹²⁾ 예가 있다. 그러나 플라즈마 에칭에 있어서는 一般的으로 純化學的인 反應뿐만 아니라 스퍼터링 등에 의한 物理的인 反應도 동시에 행해지고 있으리라고 생각된다. 그러한 意味로 더욱 효과적인 방법은 探針法에 의한 결과를 플라즈마의 赤外吸收分析 및 發光

分析 등으로 活性種의 종류와 粒子 운동 에너지를 實測結果와 견주어 종합적으로 검토함으로써 보다 상세한 에칭반응 과정을 探知할 수 있을 것이며 유력한 수단이 될 것으로 생각한다.

V. 結 論

本 研究에서는 플라즈마 에칭에서 CF₄ 가스 RF 글로우 放電플라즈마의 諸量을 探針法에 의해 測定하는 方法을 확립함과 동시에 플라즈마 諸量의 測定結果와 Si 웨이퍼 에칭과의 관계를 논의하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 플라즈마내의 電子密度의 증가는 活性種의 증가를 가져오며 따라서 에칭속도를 증가시킨다. 本 實驗結果 에칭속도는 전자밀도의 1.9승 정도로 증가한다.
2. 전자온도는 가스압력의 증가에 따라 감소하며 따라서 가스압력이 낮아지면 전자의 운동에너지 및 활성종 운동에너지가 증가하여 에칭 速度는 증가한다.
3. 本 測定結果 플라즈마 에칭시의 플라즈마 전자밀도는 10⁸cm⁻³~10⁹cm⁻³ 정도이며 電子溫度는 10⁴K ~ 10⁵K로서 매우 높은 값이다.
4. 探針法은 에칭시 모니터用으로 이용이 가능하며 이를 이용하여 Si 웨이퍼 에칭시의 제어가 가능하다.
5. 探針法으로 플라즈마 諸量을 測定하여 分析하는 方法은 각종 플라즈마 에칭(plasma assisted etching) 機構의 研究方法으로서 간단하고 유용한 방법이 된다. 앞으로 探針法에 의한 에칭特性에 대한 基礎的인 데이터들 더욱 쌓아 올려 이것을 分光 및 發光分析實測과 關聯시켜 플라즈마 에칭 機構를 解明해 나가는 것이 바람직한 課題로 본다.

參 考 文 獻

[1] B. Chapman, *Glow Discharge Process.*, John Wiley and Son N.Y. 1980.
 [2] L.M. Ephrath, "Dry etching for VLSI-A review," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 129, no. 3, pp. 62c-66c, 1982.
 [3] R.G. Poulsen, "Plasma etching in integrated circuit manufacture - A review," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 1, pp. 266-274, 1977.
 [4] J.W. Coburn and H.F. Winters, "Plasma etching - A discussion of mechanisms," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 2, pp. 391-403, 1979.
 [5] B.A. Raby, "Mass spectrometric study of plasma etching," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 205-208, 1978.

- [6] V.M. Donnelly and D.L. Flamm, "Effects of frequency on optical emission, electrical, ion and etching characteristics of r.f. chlorine plasma," *J. Appl. Phys.*, vol. 58, no. 6, pp. 2135-2144, 1985.
- [7] M.J. Kushiner, "A kinetic study of the plasma etching process," *J. Appl. Phys.* vol. 53, no. 4, pp. 2923-2938, 1982.
- [8] L. Schott, *Plasma Diagnostics*, edited W. Lochte-Holtgreten., North-Holland, Amsterdam, pp. 668-731, 1968.
- [9] 入田吉典, 氣體放電, 近代科學社, pp. 116-129, 1968.
- [10] E. Eser, R.E. Ogilvie and K.A. Taylor, "Plasma characterization in sputtering processes using the Langmuir probe technique," *Thin Solid Films*, vol. 68, pp. 381-392, 1980.
- [11] R.M. Clements, "Plasma diagnostics with electric probe," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 193-198, 1978.
- [12] Y. Kawamoto and N. Hashimoto, *Proceeding of the 10th Conference Solid State Device*, Japan, pp. 73, 1979.
-