

이온질량분석기의 제작과 그 동작특성

論 文

50C-8-7

Fabrication of Ion Mass Analyzer and its Operational Characteristics

金光勳* · 崔永旭** · 李弘植*** · 林根熙[§] · S.A. Nikiforov^{§§}

(Guang-Hoon Kim · Young-Wook Choi · Hong-Sik Lee · Geun-Hie Rim · S.A. Nikiforov)

Abstract - The information of the ion composition in plasma applications is required to characterize a plasma. A better understanding of ion species composition ratio and its spacial distribution, etc. is thus necessary in plasma-related processes, such as thin film deposition, plasma-based ion implantation, semiconductor processing, and so on. In this research, a compact ion mass analyzer that is based on magnetic sector analyzer was developed and its operational characteristics were studied in nitrogen plasma.

Key Words : ion mass analyzer, ion composition, magnetic-sector, ion loss

1. 서 론

플라즈마와 관련된 연구와 응용에서 플라즈마 내에 여러 종류의 이온들이 존재할 때 어떤 종류의 이온들이 존재하는지, 그 구성비가 어떤지 그리고 공간적 분포가 어떤지, 압력 등의 다른 변수들에 따라 어떻게 변하는지 등에 대한 정보를 얻는 것은 중요하다 [1]. 특히, 박막 제조, 플라즈마 코팅, 플라즈마 이온주입, 반도체 프로세싱 등과 같은 플라즈마 공정에서는 공정 결과를 결정짓는 중요한 요소이다 [2-5]. 특히, 우리가 이온질량분석기를 제작하여 적용하고자 하는 플라즈마 소스 이온주입의 경우에는 이온의 에너지, 주입깊이, 주입량, 공간적인 균일도 및 오염물질의 존재 등과 관련되어 처리된 시료의 특성에 큰 영향을 미친다 [6,7]. 이온 종류와 구성비율은 플라즈마 원의 종류, 가스의 종류와 압력, 플라즈마 밀도 등의 여러 가지 공정 변수들에 의하여 복합적으로 결정되므로 이론적인 모델링으로 예측하는 데는 한계가 있다. 따라서, 이온의 종류 및 분포에 대한 정량적인 정보는 질량분석기를 사용하여 실험적으로 측정되어야 한다. 최근 들어서 플라즈마 내에 존재하는 이온에 대한 연구가 활발히 진행되고 있지만 상용화된 질량분석기는 대개 크고 복잡하며 값비싼 장비라는 단점이 있다. 따라서, 플라즈

마 장비에 부착하여 손쉽게 사용할 수 있는 작은 크기의 간단하고 값싼 이온 질량분석기의 개발이 요구된다.

플라즈마 질량 분석은 많은 연구가 진행되고 있는 분야로서 다양한 형태의 측정장치와 기술들이 사용되고 있다 [8]. 사분극 질량 분석기는 플라즈마에 있는 중성 및 이온 종들의 분석에 많이 사용되고 있지만 장치가 복잡하고 고가이다 [9]. 그리고 대부분의 질량분석기들은 반응기의 벽 근처에서 이온들을 추출하는데 이는 플라즈마 내부에 있는 이온들의 구성과 많이 다를 수 있으므로 많은 주의가 요구된다 [1,8]. Wien filter를 이용하여 질소 플라즈마를 분석하고 [7] 이동이 가능한 소형의 이온질량분석기를 제작하여 플라즈마 반응기 내부에 장착하고 질량분석을 한 경우도 있다 [10,11]. 이러한 장점에도 불구하고 이들은 질량분해능이 낮고 (~10) 별도의 배기시스템을 장착하기가 쉽지 않다는 단점이 있다.

본 연구에서 우리는 실시간으로 플라즈마 내의 이온들을 직접 추출하고 분석할 수 있는 간단하고 값싼 이온질량분석기를 제작하고 질소 플라즈마에 적용하여 그 동작특성을 연구하였다.

2. 이온질량분석기의 동작 원리

2.1 질량분석기

질량분석기는 이온화된 원자나 분자 등 입자의 질량 대전하 비의 차이를 이용하여 그들을 각각 분리하고 그 양을 측정하는 것으로 이미 알고 있는 성분에 대한 정량 분석 뿐만 아니라, 미지성분에 대한 분자구조 분석 및 화학적 특성을 규명하는 데 사용된다. 질량분석기는 측정할 시료를 이온화 시켜 그것을 가속시키는 부분인 이온원, 그 이온의 질량에 따라 분리하는 분해기, 그리고 분리된 이온의 양을 측정하는 검출기의 세 부분으로 구성되어 있다. 이온을 분류하는 방식에 따라 마그네틱 섹터 (magnetic sector) 방식,

* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 플라즈마 가속기 연구단 先任研究員 · 理博

** 正 會 員 : 韓國電氣研究院 電氣物理그룹 責任研究員 · 工博

*** 正 會 員 : 韓國電氣研究院 電氣物理그룹 그룹장 · 工博

§ 正 會 員 : 韓國電氣研究院 産業電氣研究團 단장 · 工博

§§ 非 會 員 : 韓國電氣研究院 電氣物理그룹 유치과학자 (NIIEFA, Saint Petersburg, Russia)

接受日字 : 2001年 6月 7日

最終完了 : 2001年 7月 9日

사중극자 (quadrupole) 방식, 이온트랩 (ion trap) 방식, 푸리에-이온 사이클론 공명 (Fourier transform - ion cyclotron resonance : FT-ICR) 방식, 비행시간 (time of flight : FOT) 방식 등으로 나뉜다.

본 연구에서는 플라즈마에서 직접 이온을 추출하여 분석하려고 하기 때문에 별도의 이온화 소스가 필요없다. 측정하고자 하는 특정 위치에서 플라즈마 내의 이온빔을 추출하고 높은 에너지로 가속시킨 후에 자기장을 인가하여 이온들을 질량 대 전하의 비로 분리하는 방법을 사용하였다. 마그네틱 필터에는 섹터 마그넷과 Wien 필터가 있는데 우리는 분해능이 보다 우수한 마그넷-섹터 방식을 채택하였다. 기존의 시스템에서는 전자석을 이용하여 자기장 분포를 만들고 그 코일에 흐르는 전류를 조절하여 이온 빔을 스캔하였다. 즉, 이온의 에너지는 고정되어 있고 자기장의 세기는 변한다. 하지만, 자기장을 스캔하는 경우에 코일의 인덕턴스 때문에 스캔 주파수가 제한되고 또한 hysteresis가 있어서 실시간으로 플라즈마 이온을 분석하기에는 문제가 있다. 그래서, 본 연구에서는 자기장은 영구자석을 이용하여 고정시키고 그 영구자석 부분에 톱니파의 전압파형을 인가하여 이온의 에너지를 변화시킴으로서 이온빔을 스캔하였다. 이렇게 영구자석을 이용하면 스캔 주파수를 비교적 높게 (~ 수십 Hz 이상) 유지할 수 있어서 오실로스코프 화면으로 직접 볼 수 있을 뿐만 아니라 실시간으로 이온 양의 변화를 모니터링할 수 있다. 또한 정전기적 스캔 방법을 사용하면 플라즈마 전위를 측정할 수 있다는 장점이 있다.

2.2 마그네틱-섹터 질량분석기의 원리

전하상태 Z인 이온이 전위 V에 의하여 가속되면 운동에너지 ZeV를 얻게 된다. 이온들의 초기 에너지에 비하여 가속 에너지가 매우 크다면 이온들은 모두 같은 운동 에너지를 갖는다고 할 수 있다. 즉,

$$ZeV = \frac{mv^2}{2} \tag{1}$$

여기서, m은 이온질량이고 v는 이온이 가속된 후에 갖게 되는 종단 속도이다. 균일한 분포를 갖는 자기장에 속도 v를 갖는 이온들이 수직하게 입사하면 Lorentz 힘과 원심력의 균형으로 전하를 띤 입자들은 원형 궤도를 그린다.

$$ZevB = \frac{mv^2}{r} \tag{2}$$

여기서, r은 원형 궤도의 반경으로서 Larmor radius라고 한다. 식 (1)과 (2)에서 속도성분을 제거하면 다음과 같이 회전반경을 구할 수 있다.

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mV}{Ze}} \tag{3}$$

즉, 회전반경은 자기장의 세기(B)나 전위의 세기(V)에 의하여 결정된다.

자기장세기 B를 gauss 단위로 하고, 질량 m은 원자질량단위 (AMU)로 하고, 가속전위 V는 volt 단위로 하면 회전반경은 cm 단위로 다음과 같이 표현된다.

$$r[cm] = \frac{144}{B[gauss]} \sqrt{\frac{m[AMU] V[V]}{Z}} \tag{4}$$

예를 들어, Z=1인 질소분자이온(N₂⁺, M=28)이 400 V 전위에 의하여 가속되어 B=1000 gauss인 자기장에 입사하면 이온은 반경이 r=150 mm인 궤도를 따라 회전한다.

2.3 섹터 마그넷의 구조와 이온광학

섹터 마그넷은 제한된 영역에 걸쳐서 일정한 자기장 분포를 갖는 갭으로 구성되어 있다. 자기장은 질량 대 전하량의 비에 따라 이온들을 분리시키고 집속면에 집속시킨다. 그리고 검출기의 슬릿을 이용하여 측정하고자 하는 이온을 선택한다. 따라서 분석기의 분해능을 높이기 위해서는 슬릿의 위치가 집속면에 있으면서 슬릿의 폭이 작을수록 좋다. 섹터를 통과한 하전입자들의 집속은 자기장 특성의 변화보다는 자기장 경계의 위치나 모양에 의하여 결정된다. 일차근사로, 자기장은 섹터 내부에서 일정($\mathbf{B} = B\hat{x}$)하고 경계에서 급격히 줄어들어 섹터 내부에서는 B=0라고 할 수 있다. 자기장의 방향과 평행인 \hat{x} 방향은 대개 수직방향이라고 하고 자기장과 직각인 \hat{y} 방향은 수평방향이라고 한다. 그리고 \hat{z} 방향은 빔 축으로 섹터 내부에서 휘어져 있으며 central orbit이라고도 한다. 섹터 마그넷은 자기장을 빠져나오는 입자들의 궤도를 수평방향으로 수렴하게 하는 두꺼운 렌즈 역할을 한다. 축에서 벗어난 입자들은 자기장내에서의 이동거리가 달라지므로 휘어지는 정도가 달라서 집속이 발생한다. 섹터 각도가 $\theta < 90^\circ$ 이면 섹터 경계에서 초점까지의 거리가 양이 되어 섹터 마그넷을 통과하는 입자들은 수렴한다.

컴팩트한 질량분석기를 제작하기 위해서는 입자의 회전반경을 줄여서 섹터의 크기를 줄일 수 있다. 그러나, 자기장의 세기를 증가시키거나 가속 전위를 낮추면 회전 반경을 줄일 수는 있지만 질량분석기의 질량분해능이 떨어진다. 다른 방법으로는 섹터 마그넷의 크기를 유지하면서 초점길이를 줄일 수 있는데 edge-focusing을 이용하는 것이다 [12]. 섹터의 경계를 빔 축에 대하여 비스듬하게 하면 빔축 바깥의 이동경로는 더 길어지고, 반대로, 빔축 안쪽의 이동경로는 더 짧아지므로 집속효과가 더 강하게 나타난다. 이러한 원리를 이용한 것이 edge-focusing magnetic mass spectrometer이다. 본 연구에서 사용한 섹터 마그넷의 구조와 이온 광학을 그림 1에 나타내었다. 여기서, θ 는 섹터 마그넷의 펼쳐진 각도이고 섹터 내에서 빔 축을 지나가는 이온의 이동거리는 $R\theta$ 이다. 이온추출부의 위치가 변하더라도 고정된 위치에서 초점이 맺히도록 하기 위하여 이온추출부의 이온광학을 이용하여 섹터에 입사되는 이온빔을 평행하게 만들고 (자세한 내용은 3.1절에) 섹터의 입사 경계를 그 빔축에 수직하게 하였다. 그리고 섹터의 출구에 비스듬한

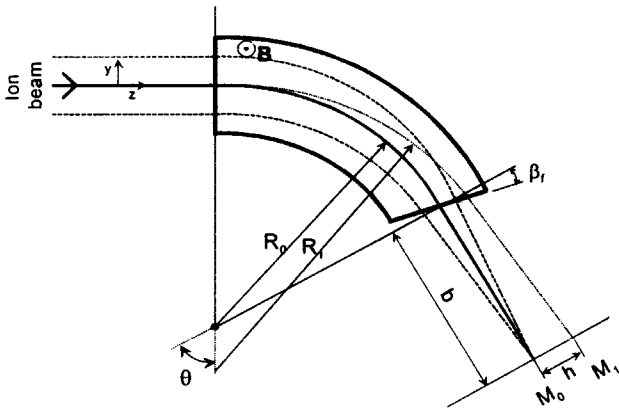


그림 1. 섹터 마그넷의 구조와 이온광학

경계를 두어 초점길이를 줄였다.

그림 1에서 전하량이 같고, 질량이 다른 두 입자 (M_0, M_1)가 섹터 마그넷을 통과하면서 서로 다른 경로를 따라 회전을 하는데 (R_0, R_1) 집속면에서의 간격은 다음과 같이 수식적으로 계산된다.

$$h = \left(\frac{R_1}{R_0} - 1 \right) \left\{ R_0 \left[\frac{\sqrt{\left(\frac{R_1}{R_0} \right)^2 - \left(\frac{R_1}{R_0} - 1 \right)^2 \sin^2 \theta} - 1}{\frac{R_1}{R_0} - 1} - \cos \theta \right] + b \frac{\sin \theta}{\sqrt{\left(\frac{R_1}{R_0} \right)^2 - \left(\frac{R_1}{R_0} - 1 \right)^2 \sin^2 \theta}} \right\} \quad (5)$$

만약, $R_1/R_0 \gg (R_1/R_0 - 1) \sin \theta$ 이면 $R_1/R_0 = \sqrt{M_1/M_0}$ 를 이용하여 식 (5)를 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$h \approx \left(\sqrt{\frac{M_1}{M_0}} - 1 \right) [R_0(1 - \cos \theta) + b \sin \theta] \quad (6)$$

질량분산(mass dispersion)은 같은 전하량, 같은 에너지를 가지면서 질량수의 차이가 1인 ($\Delta M = 1$) 두 이온이 집속면에서 얼마나 떨어져 있느냐를 나타내는 것으로 분해능과 관계가 있으며 질량이 큰 ($M \gg 1$) 경우에는 식 (6)을 이용하여 질량분산을 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\delta \equiv \frac{dx}{dM} \approx \frac{R_0(1 - \cos \theta) + b \sin \theta}{2M} \quad (7)$$

즉, 질량분산이 질량에 반비례하므로 질량이 증가할수록 분석기의 분해능이 낮아진다.

이온빔 광학의 transfer matrix를 이용하여 [12] 이온질량 분석기에서 빔의 진행을 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y'_1 \end{pmatrix} = \mathbf{A}_{drift} \mathbf{A}_{edge} \mathbf{A}_{sec} \mathbf{A}_{edge} \mathbf{A}_{drift} \begin{pmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} 1 & b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\tan \beta_f / R_0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & R_0 \sin \theta \\ -\sin \theta / R_0 & \cos \theta \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\tan \beta_i / R_0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & a \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{pmatrix} \quad (8)$$

단, 여기서 $y'_0 = (dy/dz)$ 로서 진행방향에 대한 이온빔의 기울기를 나타낸다. a 는 이온소스에서 섹터의 입구 경계까지의 거리이고 b 는 섹터의 출구에서 초점까지의 거리이다. R_0 와 θ 는 섹터에서 주 궤도의 회전반경과 섹터의 펼쳐진 각도이다. 그리고 β_i 와 β_f 는 각각 섹터 입구와 출구에서 섹터 경계가 주 궤도의 수직선과 이루는 각도, 즉, 섹터 경계의 기울어진 정도를 나타내는 각도이다. 평행빔($a = \infty$)이 입사되고 $\theta = 60^\circ, \beta_i = 0^\circ, \beta_f = 11.5^\circ, R_0 = 150 \text{ mm}$ 일 때 식 (8)을 이용하여 섹터 출구에서 초점까지의 거리를 계산하면 대략 $b \approx 78 \text{ mm}$ 이다. 참고로, 만약 섹터의 edge focusing이 없으면 ($\beta_i = \beta_f = 0^\circ$) 출구에서 초점까지의 거리는 87 mm 로 계산된다. 위의 조건에서 질량분산을 계산하면 $\delta \approx 71/M \text{ [mm]}$ 가 된다. 즉, 질량이 71, 72인 이온들은 집속면에서 1 mm 떨어진 위치에서 집속된다.

그리고 질량분석기의 분해능은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$R \equiv \frac{M}{\Delta M} = \frac{\delta}{s_1 + s_2 + \Delta_E + \Delta_\epsilon} \quad (9)$$

여기서, Δ 는 질량분산이고, s_1 과 s_2 는 각각 이온추출부의 직경과 검출기 슬릿의 폭이다. Δ_E 와 Δ_ϵ 은 각각 이온에너지의 종방향 퍼짐에 의한 빔 크기의 증가와 유효 beam emittance를 나타낸다. 분해능을 높이기 위하여 이온추출부 직경과 검출기 슬릿의 폭을 줄이면 이온빔의 세기가 작아져서 신호의 감지도가 떨어진다. 따라서, 높은 분해능과 높은 감지도를 얻기 위해서는 질량분산은 클수록, 에너지 퍼짐과 emittance는 작을수록 좋다.

3. 이온질량분석기의 제작

이온질량분석기는 플라즈마 내부에서 이온빔을 직접 추출하고 평행빔으로 만드는 이온추출부(ion extracting part), 질량 대 전하량의 비에 따라 이온들을 분리하는 섹터 마그넷(60° 부채꼴 영구자석부)을 포함한 마그넷 진공 챔버부(magnet vacuum chamber part), 이온량을 측정하기 위한 Faraday cup의 측정부(detection part), 이온 추출 및 스캔 등을 위한 전원부(power supply part), 그리고 분석기 내부

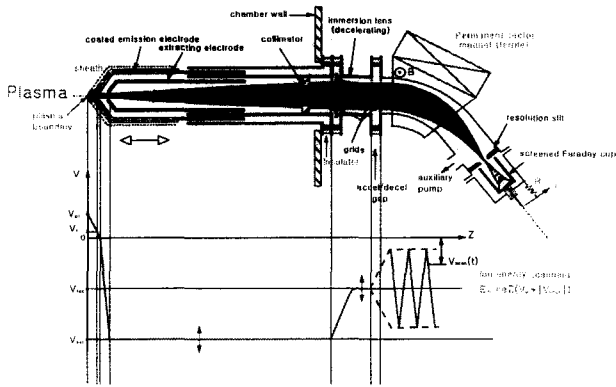


그림 2. 이온 질량분석기의 개략도와 위치에 따른 전위의 변화

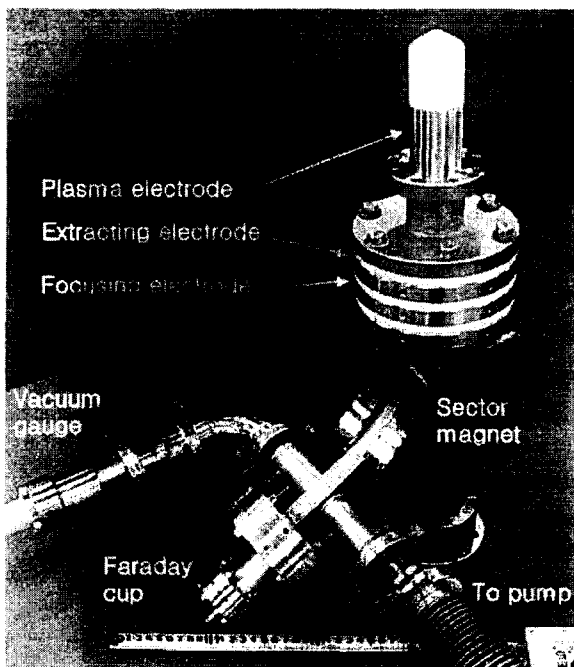


그림 3. 제작된 이온질량분석기의 사진

를 고진공으로 유지하기 위한 진공부(vacuum part) 등으로 구성되어 있다. 그림 2는 이온질량분석기의 구조를 나타내는 개략도와 위치에 따른 전위의 변화를 나타낸 것이다. 추가로, 이온빔이 플라즈마로부터 추출된 이후에 Faraday cup에 이르기까지의 진행을 함께 표시하였다. 그림 3은 실제 제작된 이온질량분석기의 사진이다.

3.1 이온추출부

플라즈마 전극(plasma electrode)에 직경 0.5~1.0 mm의 구멍을 만들고 바로 뒤에 위치한 추출 전극(extracting electrode)에 -1 ~ -3 kV의 부전압을 인가하여 이온들을 추출하였다. 플라즈마 전극과 추출전극은 스테인레스 스틸로 제작되었다. 플라즈마 전극의 표면을 절연물(Al_2O_3)로 코팅하여 플라즈마에 가해지는 영향을 최소화하였고 분석기를 플라즈마 챔버에 부착할 수 있도록 플라즈마 전극의 끝단에 연결부를 만들었다. 그리고 플라즈마 전극과 추출 전극을 각각 두 부분으로 나누고 앞부분은 100 mm까지 움직일 수

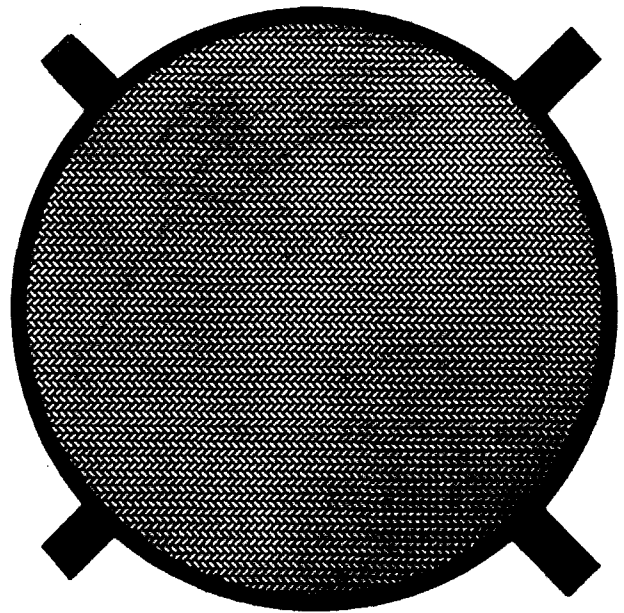


그림 4. Molybdeum 격자의 사진

있도록 하여 플라즈마 챔버 내부에서 이온빔을 추출하는 위치를 변경할 수 있도록 하였다. 추출 전극의 후반부에 내경 10 mm의 링을 부착하여 이온빔이 collimated 되도록 하였다. 플라즈마 변수들이나 이온빔을 추출하는 위치가 변하더라도 분해슬릿(resolution slit)에서 초점이 맺히도록 하기 위하여 집속 전극(focusing electrode)를 설치하여 추출 전극과 집속 전극 사이에 electrostatic immersion lens가 형성되도록 하였다. 렌즈효과를 높이고 수차를 줄이기 위하여 추출 전극 끝단에 격자(grid)를 배치하여 immersion lens를 grid focusing으로 변형시켰다. 스캔 전압이 magnetic vacuum chamber에 인가될 때 기생 렌즈가 생기는데 이를 방지하기 위하여 집속 전극의 끝단과 magnetic vacuum chamber의 입구에 각각 격자를 배치하였다. 여기에서 사용된 3개의 격자들은 두께 100 μ m의 molybdeum 판을 에칭 처리하여 제작하였고 투과도는 약 85 %로 매우 높다. 격자의 유효 직경은 40 mm이고 사진은 그림 4와 같다. 이온빔의 투과도를 증가시키고 국소적인 과열에 의한 격자의 변형을 방지하기 위하여 격자를 parquet cell 배열의 미세구조로 제작하였다.

3.2 마그넷 진공 챔버부

마그넷 진공챔버는 휘어지는 이온빔 궤도 ($R_0 = 150$ mm)를 포함하도록 수평방향 50 mm, 수직방향 20mm의 직사각형이 휘어진 형태로 제작하였다. 그리고 여기에 $25 \times 40 \times 10$ mm³의 ferrite 영구자석 48를 포함하는 섹터 마그넷 ($\theta = 60^\circ$, $\beta_i = 0^\circ$, $\beta_f = 11.5^\circ$)을 강자성 물질로 제작하여 마그넷 진공챔버에 부착하였다. 마그넷 갭에서의 자기장 세기는 약 900 gauss로 상당히 균일하였다. 마그넷에 이온 에너지 스캔을 위한 고전압이 인가되므로 절연 파이프를 통하여 400 l/s 용량의 터보분자펌프를 마그넷 진공챔버의 후반부에 연결하고 cold-cathode type의 진공계이저를

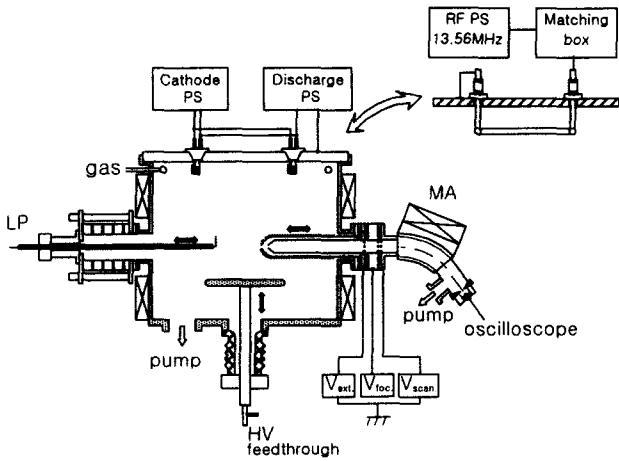


그림 5. 플라즈마 소스 이온주입의 실험 장치도

부착하여 압력을 측정하였다. 이온을 추출하는 구멍이 작고 배기장치의 용량이 크므로 이온빔이 추출되고 난 후에 챔버 내의 압력이 급격히 낮아진다. 따라서 이온빔이 분석기 내부를 통과하면서 겪게되는 이온손실을 크게 줄일 수 있다 (자세한 내용은 4절에). 플라즈마 챔버의 압력이 10 mtorr일 때 마그넷 진공챔버의 Faraday cup 부근에서 압력은 3×10^{-5} torr 이하로 낮게 유지하였다.

3.3 이온 검출부와 측정장치 및 기타 전원부

분석기의 집속평면에 폭 1 mm의 분해슬릿을 위치하고 Faraday cup으로 이온량을 측정하였다. Faraday cup에서 측정된 이온전류 신호의 감지도를 높이기 위하여 MHV (miniature high voltage) 단자가 부착된 상용 electrical feedthrough를 사용하였고 동축케이블을 이용하여 신호를 전달하였다. 플라즈마 전극은 플라즈마 챔버에 접지되어 있고 추출 전극에는 -1 ~ -3 kV의 DC 전압이 인가된다. 집속 전극에는 최대 1kV의 DC 전압이 인가되고 여기에 톱니파의 고전압이 중첩된 스캐닝 전위가 마그넷 진공챔버에 인가된다. 파형발생기의 출력을 bipolar power supply로 증폭하여 0 ~ 1 kV의 톱니파 전압파형을 발생시켰다. 스캐닝 전압은 고전압 프로브를 이용하여 oscilloscope의 X 채널에 넣고 Faraday cup의 이온전류를 Y 채널에 넣어서 질량 스펙트럼을 실시간으로 얻었다. 이온전류는 oscilloscope의 내부저항 1 MΩ을 이용하였다.

4. 이온손실 해석

이온손실은 주로 이온과 중성가스 사이의 충돌과정에서 resonance charge exchange 때문에 발생된다 [13]. 이온의 에너지와 중성가스의 밀도를 고려하면 이온의 손실은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I_i = I_{i0} \cdot \exp\left[-\int_0^d \sigma_{i/0}(z, E) n_g(z) dz\right] \quad (10)$$

여기서 I_i 는 측정된 이온전류이고, I_{i0} 는 손실이 없을 때의

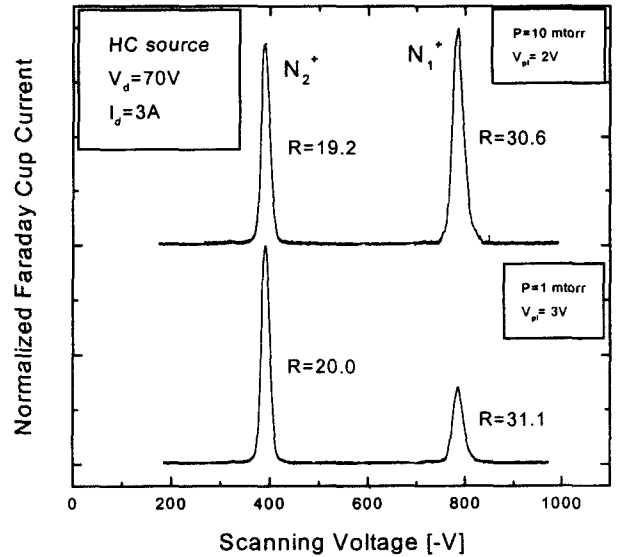


그림 6. 열음극방전에서 생성된 질소 플라즈마의 질량스펙트럼 ($V_d = 70$ V, $I_d = 3$ A)

전류이다. $n_g(z)$ 는 분석기 내의 위치에 따른 중성가스의 밀도이고 resonance charge exchange cross section $\sigma_{i/0}(z, E)$ 는 이온의 에너지 (E)에 의존한다. 그리고 d 는 이온이 추출된 후에 검출기에 이르기까지의 거리이다.

본 연구에서 분석기를 적용한 질소 플라즈마를 대상으로 이온손실에 대하여 살펴보자. cross section이 이온의 에너지에 의존하므로 해석을 간단히 하기 위하여 이온에너지가 400 ~ 1000 eV의 범위에서는 질소원자이온(N_1^+)의 cross section $\sigma_{10/01} = 0.5 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$, 질소분자이온(N_2^+)의 cross section $\sigma_{20/02} = 2.5 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ 으로 일정하다고 가정하였고 [13]. 질소삼원자이온(N_3^+)의 cross section은 문헌에서 찾을 수 없어서 N_2^+ 의 것과 같다고 가정하였다. 그리고 중성가스의 압력은 분석기 내부의 gas conductivity를 고려하여 위치에 따른 압력 분포를 계산할 수 있다. 그 결과, 질소 플라즈마에서 전류 비 $I_{N_1^+}/I_{N_2^+}$ 의 보정치는 플라즈마 챔버의 압력이 1 mtorr일 때 3%보다 작았고 압력이 10 mtorr일 때는 약 9%정도로 작지 않았다. 따라서, 실험적으로 측정된 이온의 구성비는 이온손실을 고려하여 보정되어야 한다.

5. 이온질량분석기의 동작특성

5.1 동작특성

제작된 이온질량분석기를 플라즈마 소스 이온주입 장치에 부착하여 열음극방전(hot cathode discharge: HC source)과 유도결합방전(inductively coupled discharge: ICP source)에 적용하여 그 동작특성을 살펴보았다. 플라즈마 소스 이온주입의 실험장치도는 그림 6과 같다 [14]. 펄스 고전압을 인가하는 시료대가 있고 측면에는 이온질량분석기와 Langmuir probe(LP)를 부착하였다. 열음극방전과 유도결합방전 소스를 부착한 별도의 커버 플렌지를 제작하여 방전소스를 쉽게 교환할 수 있도록 하였다. 열음극방전의 경우에는 열전자원

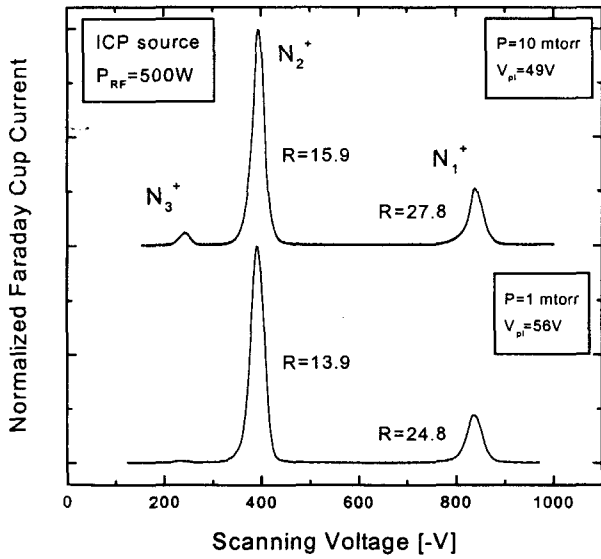


그림 7. 유도결합방전에서 생성된 질소플라즈마의 질량스펙트럼 (P_{RF} = 500 W)

으로 4개의 impregnated cathodes를 대칭적으로 배치하였고 유도결합방전의 경우에는 두 개의 반원형 안테나가 결합된 내부 전극에 13.56 MHz RF 전원을 matching box를 통하여 인가하였다. 그림 7은 열음극방전으로 생성된 질소 플라즈마에서 얻은 질량 스펙트럼의 한 예로 방전전압과 전류는 각각 70 V와 3 A일 때이다. 이온의 구성비는 플라즈마 챔버의 압력이 10 mtorr일 때 질소원자이온(N₁⁺)과 질소 분자 이온(N₂⁺)의 구성비가 비슷하지만 압력이 1 mtorr로 낮아지면 N₂⁺의 구성비가 크게 증가한다. 그리고 그림 8은 유도결합방전으로 생성된 질소 플라즈마에서 얻은 질량 스펙트럼의 한 예로 RF 파워가 P_{RF} = 500 W일 때이다. 열음극 방전에서와는 달리 유도결합방전에서는 N₂⁺의 구성비가 지배적이다. 그리고 압력이 높을 때는 N₃⁺의 존재가 뚜렷하다가 압력이 낮아지면서 거의 사라졌다.

이온의 에너지를 플라즈마 전위와 스캐닝 전위의 합, $E = eZV_0 = eZ(V_{pl} + |V_{sc}|)$ 인데, 플라즈마 전위 (V_{pl})가 고정되어 있다고 하면 분석기의 분해능을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R \equiv \frac{M}{\Delta M} = \frac{E}{\Delta E} = \frac{V_{pl} + |V_{sc}|}{\Delta V_{sc}} \quad (11)$$

스펙트럼 신호의 FWHM(full-width half-maximum)을 ΔV_{sc} 로 하면 열음극방전의 경우에 분해능은 압력이 10 mtorr일 때 30 (N₁⁺)과 19 (N₂⁺), 압력이 1 mtorr일 때 31 (N₁⁺)과 20 (N₂⁺)으로 측정되었다. 그리고 유도결합방전의 경우에는 측정된 분해능이 열음극방전의 경우보다 조금 낮았다. 측정된 분해능은 2.3절에서 살펴보았듯이 질량이 증가할수록 감소하였다. 그리고 유도결합방전의 경우에는 이온이 플라즈마 쉬스를 통과하면서 플라즈마 전위에 의한 에너지 퍼짐이 크기 때문에 열음극방전의 경우보다 낮은 분해능을 보여준다 [15]. 압력에 따른 질소 플라즈마의 이온구성비를 측정하였다. 열음극방전의 경우에는 압력이 증가할수록 N₂⁺

의 구성비가 80 % (0.1 mtorr) 정도에서 50 % (10 mtorr) 정도로 줄어들고 N₁⁺의 구성비는 20%정도에서 50%정도로 증가하였다. 하지만 유도결합방전의 경우에는 이온구성비가 2 mtorr ~ 10 mtorr 영역에서 거의 일정하였다 [15].

5.2 플라즈마 전위 측정

본 이온질량분석기를 사용하면 플라즈마의 이온 구성에 대한 정보뿐만 아니라 플라즈마 전위도 측정할 수 있는 장점이 있다. 마그넷 섹터의 자기장 세기가 일정하면 회전반경과 자기장 세기의 곱은 일정한 분석기상수(analyzer constant)로 다음과 같다.

$$C_{MA} \equiv R_0 B = \sqrt{\frac{2MV_0}{eZ}} \quad (12)$$

질량을 알고 있는 두 개 이상의 스펙트럼 피크가 있으면 위의 식을 이용하여 다음과 같이 플라즈마 전위를 얻을 수 있다.

$$\frac{M_1(V_{pl} + |V_{sc}|_1)}{Z_1} = \frac{M_2(V_{pl} + |V_{sc}|_2)}{Z_2} \quad (13)$$

플라즈마 전위는 열음극 방전의 경우에 압력이 10 mtorr일 때 2 V, 압력이 1 mtorr일 때는 3 V로 측정되었다. 유도결합방전의 경우에는 압력이 10 mtorr일 때 49 V, 압력이 1 mtorr일 때는 56 V로 측정되었다. 측정된 플라즈마 전위를 확인하기 위하여 LP를 사용하여 동시에 플라즈마 전위를 측정하였다. 유도결합방전의 경우에는 RF-compensated LP를 사용하였다 [16]. 유도결합방전에서 압력에 따른 분해능과 플라즈마 전위의 변화를 측정한 결과 압력이 증가할수록 플라즈마 전위는 낮아지고 질량분해능은 높아졌다 [15]. 측정된 플라즈마 전위의 차이는 10V 이내로 고전압 프로브 (1:1000)의 분해능(~1%)와 RF-compensation을 고려하면 좋은 결과를 얻었다고 할 수 있다. 섹터 마그넷의 자기장 세기를 내려서 플라즈마 전위를 좀 더 정확하게 측정할 수 있지만 분석기의 질량분해능이 떨어진다. 열음극 방전의 경우에는 플라즈마 전위가 낮기만 유도결합방전 또는 충전결합방전의 경우에는 수십 볼트 이상으로 매우 높으므로 플라즈마 전위가 중요한 역할을 한다. 따라서, 이온질량분석기만을 이용하여 플라즈마의 이온구성에 대한 정보뿐만 아니라 플라즈마 전위를 측정할 수 있다는 것은 중요한 의미를 갖는다.

6. 결 론

본 연구에서 우리는 플라즈마 소스 이온주입에서 이온구성 및 플라즈마 전위를 실시간으로 측정하기 위하여 간단하고 값싼 이온질량분석기를 제작하였다. 플라즈마 내부의 여러 위치에서 이온구성 및 플라즈마 전위를 측정할 수 있도록 분석기를 설계 제작하였다. 제작된 이온질량분석기를 질소플라즈마에 적용하여 테스트해본 결과 질량분해능이 30 정도로 좋았다. 필요하다면 정전 에너지분석기를 부착하여

질량분해능을 향상시킬 수 있다. 본 이온질량분석기를 이용하면 이온구성에 대한 정보뿐만 아니라 플라즈마 전위도 동시에 측정할 수 있음을 보였다. 제작된 이온질량분석기는 다른 플라즈마 장비에도 부착이 용이하여 이온분석도 쉽게 적용될 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] H. W. Drawin, *Mass spectrometry of plasmas in plasma diagnostics* (AIP, New York, 1995).
- [2] M. Tuszewski, J. T. Scheuer, and J. A. Tobin, "Composition of the oxygen plasma from two inductively coupled sources", *J. Vac. Sci. Technol.* **A13**, 839 (1995).
- [3] F. Becker, I. W. Rangelow, K. Maßeli, and R. Kassing, "Diagnostic on N_2 plasma with an energy resolved quadrupole mass spectrometer at the powered electrode in a reactive ion etching system: ion energy distribution of N_2^+ and N^+ ", *Surf. Coatings Technol.* **74/75**, 485 (1995).
- [4] E. Kusano, T. Saitoh, T. Kobayashi, K. Fukushima, N. Kikuchi, H. Nantom, and A. Kinbara, "Effects of coil dc potential on ion energy distribution measured by an energy-resolved mass spectrometer in ionized physical vapor deposition", *J. Vac. Sci. Technol.* **A17**, 2360 (1999).
- [5] Sz. Katai, Z. Tass, L. Bori, Gy. Hars, and P. Deak, "Ion beam mass spectrometer for compositional analysis of plasma assisted surface processes in the pressure range of 1-50mbar" *Rev. Sci. Instr.* **70**, 3324 (1999).
- [6] J. R. Conrad, J. L. Radtke, R. A. Dodd, F. J. Worzala, and N. C. Tran, "Plasma source ion implantation technique for surface modification of materials", *J. Appl. Phys.* **62**, 4591 (1987).
- [7] B. Y. Tang, R. P. Fetherston, M. Shamin, R. A. Breun, A. Chen, and J. R. Conrad, "Measurement of ion species ratio in the plasma source ion implantation process", *J. Appl. Phys.* **73**, 4176 (1993).
- [8] J. W. Coburn, "Mass spectrometric studies of positive ions in RF glow discharges", *Thin Solid Films* **171**, 65 (1989).
- [9] M. Zarrabian, C. Leteinturier, and G. Turban, "Mass spectrometric investigations on CH_4 plasmas obtained from a dual electron cyclotron resonance- radio frequency discharge", *Plasma Sources Sci. Technol.* **7**, 607 (1998).
- [10] E. Y. Wang, L. Schmitz, Y. Ra, B. LaBombard, and R. W. Conn, "All omegatron mass spectrometer for plasma ion species analysis", *Rev. Sci. Instrum.* **61**, 2155 (1990).
- [11] M. Tuszewski, "A compact mass spectrometer for plasma discharge ion analysis", *Rev. Sci. Instrum.* **67**, 2215 (1996).
- [12] S. Humphries, Jr., *Principles of charged particle acceleration* (John Wiley & Sons, New York, 1986).
- [13] E. W. McDaniel, *Collision phenomena in ionized gases* (John Wiley & Sons, New York, 1986).
- [14] 김광훈, S.A. Nikiforov, 이홍식, 임근희, "플라즈마 질소 이온주입한 오스테나이트 스테인레스 강의 표면특성", 1999년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 2253-2255.
- [15] G. H. Kim, G. H. Rim, and S. A. Nikiforov, "Monitoring of ion mass composition in plasma immersion ion implantation", *Surf. Coatings Technol.* **136**, 255 (2001).
- [16] I. D. Sudit and F. F. Chen, "RF compensated probes for high-density discharges", *Plasma Sources Sci. Technol.* **3**, 162 (1994).

저 자 소 개



김 광 훈 (金光勳)

1969년 2월 5일 생. 1987년 3월 - 1991년 2월 서울대 물리학과 졸업. 1993년 2월 서울대 물리학과 졸업(석사) 1998년 2월 서울대 물리학과 졸업(박사). 1998년 2월 - 2001년 7월 한국전기연구원 전기물리연

구그룹 선임연구원 2001년 8월 - 현재 한국전기연구원 플라즈마 가속기 연구단 선임연구원. 주관심분야: 비선형 광학, 플라즈마 계측, 레이저-플라즈마 상호작용.

Tel : 055-280-1494, Fax : 055-280-1490

E-mail : ghkim@keri.re.kr



임 근 희 (林根熙)

1955년 10월 7일 생. 1974년 3월 - 1978년 2월 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 Virginia Polytechnic Institute and State University 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1992년 동 대학원 졸업(공학박). 1992년 -

2000년 한국전기연구소 전기물리연구그룹장 2001년 - 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 단장. 주관심분야 : 전력변환 및 전기물리 설비개발

Tel : 055-280-1450, Fax : 055-280-1490

E-mail : ghrim@keri.re.kr



최 영 옥 (崔永旭)

1960년 6월 26일 생. 1980년 3월 - 1984년 2월 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 3월 九州大大學院 總合理工學研究科 에너지변환공학과 졸업(석사). 1997년 3월 동대학원 졸업(박사). 1984년 3월 - 1991년 10

월 한국전기연구소 연구원 1997년 4월 - 2001년 2월 한국전기연구소 전기물리연구그룹 선임연구원, 2001년 3월 - 현재 한국전기연구원 전기물리그룹 책임연구원. 주관심분야 : 방전현상의 레이저 응용 계측 (LIF), 플라즈마 응용 및 고전압 펄스 전원 설계

Tel : 055-280-1492, Fax : 055-280-1490

E-mail : ywchoi@keri.re.kr



S. A. Nikiforov

1954년 10월 8일 생. 1978년 St. Petersburg State University 졸업(석사). 1978년 2월 - 현재 NIEEFA, St. Petersburg에서 Senior Scientist. 1996년 12월 - 현재 한국전기연구원 전기물리연구그룹 유치과학자.



이 흥 식 (李弘植)

1953년 9월 13일 생. 1971년 3월 - 1975년 2월 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1990년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국전기연구원 전기물리연구

그룹 그룹장. 주관심분야 : 플라즈마 발생, 기체 레이저 제작, 고전압 펄스 발생장치

Tel : 055-280-1491, Fax : 055-280-1490

E-mail : hslee@keri.re.kr