

플라즈마 소스 이온주입용 플라즈마원의 이온 분석

김광훈\*, S.A.Nikiforov, 이홍식, 임근희  
한국전기연구소 전기물리연구그룹

Ion composition analysis of plasma sources for PSII

G.H. Kim\*, S.A. Nikiforov, H.S. Lee, G.H. Rim  
Applied Electrophysics Group, KERI

**Abstract** - A system to monitor the ion mass and charge-state as well as plasma potential value during plasma source ion implantation (PSII) has been developed. It was tested with 30-kV PI3D setup using alternatively hot cathode dc (HC) and inductively coupled RF (ICP) discharge sources. The design and performance of the system will be described, and experimental results in nitrogen and argon plasmas produced by modular HC-ICP source will be discussed

1. 서 론

플라즈마 소스 이온주입 (Plasma source ion implantation: PSII)은 3차원 형상의 시료를 표면개질하는데 적합한 응용가능성이 높은 기술로서 지난 10여년간 많은 연구가 진행되어 오고 있다 [1]. PSII는 시료를 플라즈마에 담근후에 강한 세기의 부전압 펄스를 시료에 인가하여 플라즈마에 있는 이온들이 시료 쪽으로 가속되어 침투하는 것이다. 기존의 이온빔 주입과 달리 PSII는 질량여과기가 없다. 따라서 고전압이 인가되는 동안에 플라즈마 속에 있는 모든 종류의 이온들이 시료에 침투하게 된다. 그 이온들의 구성 및 전하상태는 이온의 침투깊이, 이온 주입량 등에 영향을 미친다. 뿐만 아니라, 고전압 펄스와 펄스 사이에도 플라즈마 쉬스에 의하여 이온들은 시료의 표면에 충돌하게 된다. 그러므로 개질된 표층이나 박막의 화학적 조성 및 물리적 특성이 달라지게 된다. 유도결합형 방전 소스의 경우에는 플라즈마 쉬스를 통과하는 동안에 이온이 얻게 되는 에너지는 수십 eV 이상으로 매우 높으며 정전결합형 방전 소스의 경우에는 플라즈마 전위가 더 높다. 따라서 PSII 프로세스 과정에서 펄스 고전압과 전류뿐만 아니라 이온 질량, 이온구성비, 전하상태 등을 실시간으로 측정할 수 있으면 최적의 표면개질층을 형성하는 조건을 찾는 것이 용이해진다.

플라즈마 질량 분석은 이미 많은 연구가 된 분야로서 다양한 형태의 장비와 측정기술들이 사용되고 있다 [2]. 사분극 질량 분석기는 플라즈마에 있는 중성 및 이온 종들의 분석에 많이 사용되고 있지만 장치가 복잡하고 고가이다 [3]. 그리고 대부분의 질량분석기들은 반응기의 벽 근처에서 종들을 추출하는데 이는 플라즈마 내부에 있는 종들의 구성과 많이 다를 수 있으므로 많은 주의가 요구된다. Tang 등은 Wine filter를 이용하여 PSII의 이온 질량 구성을 측정하였다 [4]. 소형의 이동이 가능한 질량분석기를 제작하여 플라즈마 반응기 내부에 장착하고 질량분석을 한 경우도 있다 [5,6]. 여러 장점에도 불구하고 질량분해능이 10이하로 낮고 별도의 배기시스템을 장착하기가 쉽지 않다.

본 연구에서 우리는 간단하고 값싼 이온질량분석기를 제작하고 30kV급 PSII 장치에 사용된 열음극 및 유도

결합형 방전에 적용하여 질소 플라즈마의 이온질량 구성에 관하여 연구하였다.

2. 이온질량분석기 제작 및 실험

그림 1은 실험 장치도이다. PSII 장치는 30kV급으로 직경 300 mm, 높이 250 mm의 반응기 주위에 영구자석을 full line cusps 구조로 배치하여 플라즈마를 구속하였다. 플라즈마 소스로는 열음극과 유도결합형 소스를 사용하였고 위 덮개를 교환하여 플라즈마 소스를 쉽게 바꿀 수 있는 구조로 제작하였다. 열음극 방전의 경우에는 높은 방사를 갖는 4개의 impregnated cathodes를 사용하였다. 유도결합형 방전의 경우에는 두 개의 반원형 안테나가 결합된 내부 전극에 13.56 MHz RF 전원을 인가하였고 그 표면은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 코팅하였고 물로 냉각하였다. 특히, RF 플라즈마를 분석하기 위해서는 RF-compensated Langmuir probe를 사용하였는데 그 구조는 Chen의 것과 유사하다 [7].

질량분석기는 반응기의 분석창에 장착되었는데, 플라즈마 내부에서 이동이 가능한 이온추출부분, 60° 부채꼴 영구자석부분, 이온빔 스펙을 위한 이온에너지 변조부분, 그리고 이온량을 측정하기 위한 Faraday cup 등으로 구성되어 있다. 그림 2는 제작된 이온질량분석기의 사진이다. 플라즈마전극 끝에 0.5 ~ 1 mm 직경의 구멍을 만들고 추출전극에 -1 ~ -3 kV의 전압을 인가하여 이온을 추출하였다. 추출전극과 집속전극 사이에 갑속 immersion lens를 만들어서 플라즈마 변수들이나 플라즈마전극의 위치가 변하더라도 추출된 이온빔이 Faraday cup 앞에 위치한 분해슬릿에서 초점이 맺히게 하였다. 렌즈 효과를 높이고 수차를 줄이기 위하여 추출전극의 출구에 격자를 배치하였다. 스캔 전압이 magnet vacuum chamber에 인가될 때 기생 렌즈가 하나 생기는데 이를 제거하기 위하여 magnet vacuum chamber의 입구에 2개의 격자를 배치하여 평탄한 형태의 꺾을 만들었다. 또한, 스캔 전압의 변화가 빔 발산에

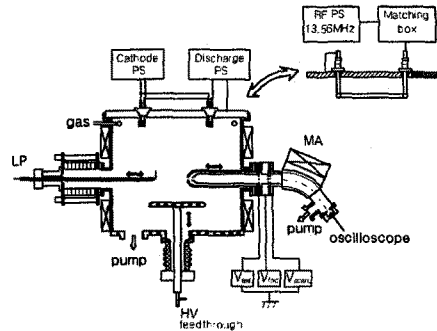


그림 1. 실험 장치도

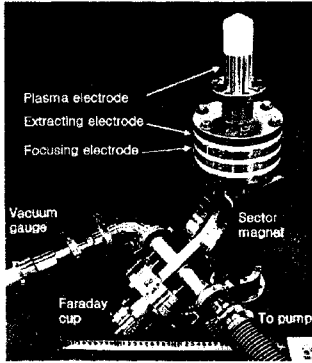


그림 2. 이온질량분석기

주는 영향을 줄여 이 값에서 이온빔이 평행하게 진행하도록 하기 위하여 분산평면에서 빔의 교차점이 분해 슬릿에 위치하게 이온 광학계를 구성하였다. 질량분석기에서 사용된 3개의 격자는 molybdenum으로 제작되었고 투과도는 약 85 % 정도이다. 이온빔의 방출도를 증가시키고 국소적인 과열에 의하여 격자가 변형되는 것을 방지하기 위하여 격자를 parquet cell 배열의 미세구조로 제작하였다. 시스템을 간단하게 하기 위하여 자기장 대신에 이온 에너지를 조절하여 빔을 스캔하였다. 그러면 자기력 문제를 피할 수 있고 이온 질량 구성을 실시간으로 측정하기 위하여 스캔 주파수를 높일 수 있다. 또한 정전기적 스캔을 이용하면 플라즈마 전위를 측정할 수 있다는 장점이 있다.

질량분석기에 differential pumping system을 장착하였다. 반응기에는 확산펌프를 장착하고 질량분석기에는 고전압이 인가되므로 절연 파이프를 통하여 터보분자펌프를 연결하였다. 이온을 추출하는 구멍이 작고 배기 장치의 용량이 크므로 이온빔이 인출되고 난 후에 압력이 급격히 낮아진다. 따라서 이온의 손실을 많이 줄일 수 있다. 반응기의 압력이 10 mtorr일때도 Faraday cup에서의 압력은  $3 \times 10^{-5}$  torr 이하로 유지하였다. 이온의 손실은 주로 resonance charge exchange 과정에서 일어난다 [8]. 이온의 에너지가 고정되어 있다면 이온의 손실은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_i = I_0 \cdot e^{-\sigma_{i0} \int n_g(x) dx}$$

여기서  $I_i$ 는 측정된 이온전류이고,  $I_0$ 는 추출된 이온전류이고,  $\sigma_{i0}$ 는 중성가스와 이온간의 resonance charge exchange 단면적이고,  $n_g$ 는 이온빔이 분석기를 진행하는 동안의 중성가스 압력인데 gas conductivity를 고려하여 그 분포를 계산하였다. 질소 플라즈마에서 질소원자이온 대 질소분자이온 비  $I_{N_1^+}/I_{N_2^+}$ 의 보정치는 1 mtorr 압력일 때 3 %보다 작았고 10 mtorr 일 때는 약 9% 정도였다. 본 논문에 있는 이온비의 결과들은 이온 손실을 고려하여 보정된 것들이다. 그리고 질소가스에서  $N_3^+$ 의 단면적을 문헌에서 찾을 수 없어서  $N_1^+$ 의 것과 같다고 가정하였다.

이온의 질량이 M이고 전하가 eZ인 경우에 분석기 상수는 다음과 같다.

$$C_{MA} \equiv rB = \sqrt{\frac{2MV_0}{eZ}}$$

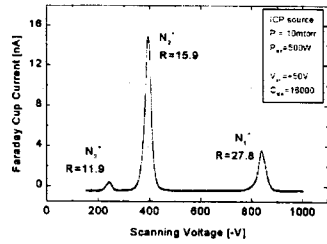


그림 3. ICP 질소 플라즈마 스펙트럼

여기서  $r$ 은 회전반경이고,  $B$ 는 자기장이고, 전위  $V_0$ 는 부채꼴 자석 내부에서 이온 에너지와 관계가 있다:  $E = eZV_0 = eZ(V_{pl} + |V_{sc}|)$ , 여기서  $V_{pl}$ 과  $V_{sc}$ 는 플라즈마 전위와 스캔 전압이다. 본 장치에서는 회전반경을 150 mm로 하였고 부채꼴 자석 내부의 자장은 약 0.09 T이다. 질량을 알고 있는 두 개 이상의 전위를 알면 위의 식을 이용하여 플라즈마 전위를 얻을 수 있다. 즉, 복잡하게 Langmuir probe를 사용하는 대신에 플라즈마 전위를 실시간으로 쉽게 측정할 수 있다.

여러 가지 산술기능을 갖춘 digitizing oscilloscope를 사용하여 데이터를 얻고 기본적인 처리를 하였다. Kepco bipolar 증폭기로 증폭된 튜니파에 DC를 합하여 0 ~ 1 kV의 스캔 전압을 발생시켰다. lead 캐패시턴스의 영향을 최소화하기 위하여 스캔 주파수는 7 Hz로 고정하였다. Faraday cup은 반응챔버의 압력보다 낮게 하였고 잡음을 줄이고 누설저항을 크게하기 위하여 동축 케이블을 사용하였다. 이온전류는 oscilloscope의 1 M $\Omega$  입력 저항을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 이온질량분석기의 분해능과 플라즈마 전위 측정

그림 3은 질소 ICP 플라즈마에서 얻은 이온 질량 스펙트럼의 한 예를 보여준다. RF power는 500 W이고 압력은 10 mtorr이다. Faraday cup에서의 이온전류는 부의 스캔전압으로 표시되었다. 분석기 상수는  $C_{MA} = 16000$  [cm gauss]이다.  $N_1^+$ ,  $N_2^+$ ,  $N_3^+$ 의 피크들이 뚜렷이 구분된다. 플라즈마 전위는 고정되어 있다고 할 수 있으므로 질량분해능은 다음과 같이 표현될 수 있다.

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

질량분석기의 이론적인 분해능은 슬릿의 폭이 1 mm이고 추출 구멍의 직경이 1 mm일 때 약 40인 것으로 계산되었다. 그림 2에서 측정된 분해능은  $N_1^+$ ,  $N_2^+$ ,  $N_3^+$ 에 대하여 각각 27.8, 15.9, 11.9이다. 여기서 측정된 전류 피크의 FWHM을  $\Delta V_{sc}$ 로 하였다. 측정된 분해능은 이온이 무거울수록 낮아진다. 이는 이온이 낮은 에너지를 가질 때 분해능은 분석기의 기하학적 구조보다 빔 방출의 유효값이나 횡단 방향 이온에너지의 퍼짐에 의하여 제한된다.

그림 4는 ICP 질소 플라즈마에서 측정된 분해능의 압력에 따른 변화를 나타낸 것이다. 또한 질량 스펙트럼에서 얻은 플라즈마 전위의 변화도 함께 그렸다. 플라즈마 전위가 높아질수록 분해능이 떨어지는 것으로 보아서 이들간에는 상호관계가 있음을 보여준다. 분해능이 떨어지는 것은 플라즈마 전위가 증가할수록 이온에너지의 퍼

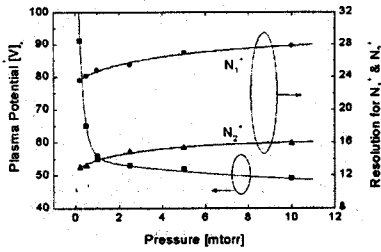


그림 4. ICP 질소 플라즈마의 질량분해능과 플라즈마 전위

집이 강해지고 이온 온도가 높을 때 추출된 이온빔의 방사도가 증가하기 때문이다 [9-11]. ICP 방전에서 Langmuir probe와 질량분석기를 동시에 사용하여 플라즈마 전위를 측정하였다. 측정된 플라즈마 전위의 차이는 10 V 이내였는데 이는 고전압 프로브(1:1000)의 감도와 RF-compensation이 완전하지 않음 등에 기인

한다. 부채꼴 자석의 자기장을 약화시켜 분석기의 질량분해능을 떨어뜨리면 플라즈마 전위 측정의 정확도를 높일 수 있다. HC 방전에서 질량분해능은 ICP의 경우보다 약간 높았고 측정된 영역에서  $N_1^+$ 인 경우에는 32,  $N_2^+$ 의 경우에는 20으로 거의 일정하였다.

### 3.2 이온 질량 구성

압력이 0.2 ~ 10 mtorr인 영역에서 HC 방전과 ICP 방전에서 질소 이온의 구성비를 측정하여 나타낸 것이 그림 5와 6이다. 구성비는 전류 피크의 값으로 계산하였는데 전류 면적으로 계산한 것과 거의 같았다. 측정된 이온 구성비는 이온손실을 고려하여 보정한 것이다. 그림 4와 5를 보면 이온구성비가 HC와 ICP의 경우에 그 경향성이 다름을 알 수 있다. HC 방전의 경우에는 질소 원자 이온의 비율이 압력이 증가하고 방전 전류가 증가함에 따라 증가한다. 압력이 10 mtorr, 전류가 5 A일 때는 50 % 이상이 원자 이온이다. ICP 방전의 경우에는 RF 파워가 높으면 압력이 1 ~ 10 mtorr 일 때 원자 이온의 비율이 30 % 이상으로 증가하고 압력이 낮아지면 유도결합-정전결합 모드 변환이 일어날 때까지 원자이온의 비율이 증가한다 [12]. 압력이 낮아져서 정전결합이 유도될 때 원자 이온의 비율이 갑자기 줄어든다. 그러한 전이는 RF 파워가 400 W이고 압력이 0.5에서 0.2 mtorr로 감소할 때 관측된다. ICP 방전의 경우에 압력 의존성은 약하고 압력이 증가할수록  $N_2^+$ 가 조금씩 증가함을 보여준다. 이렇게 HC 방전과 ICP 방전에서 이온의 구성비가 서로 다른 경향성은 나타내는 것은 전자 에너지 분포 함수 (electron energy distribution function: EEDF)가 서로 상이하게 다르기 때문인 것으로 여겨진다. HC 방전의 경우에 EEDF는 압력이 낮을 때 bi-Maxwellian이고 압력이 증가하면 Maxwellian으로 변하는 경향이 있다. ICP 방전에서 EEDF는 압력이 10 mtorr 이하 일 때 낮은 에너지의 전자들이 높은 온도를 갖음을 보여준다 [13]. 보다 자세한 고찰은 차후로 미루기로 하자.

## 4. 결론

본 연구에서 우리는 플라즈마 소스 이온주입에서 이온구성 및 플라즈마 전위를 실시간으로 측정하기 위하여 간

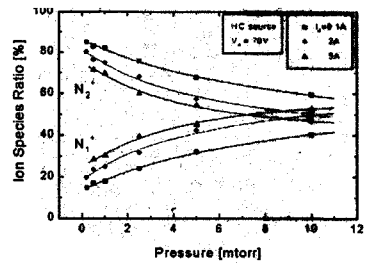


그림 5. HC 질소 플라즈마의 이온구성비

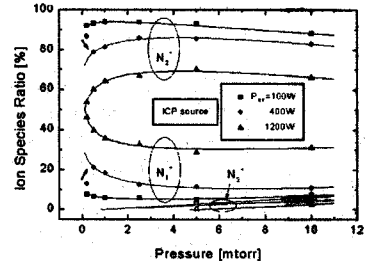


그림 6. ICP 질소 플라즈마의 이온구성비

단하고 값싼 이온질량분석기를 제작하였다. 플라즈마 내부의 여러 위치에서 이온구성 및 플라즈마 전위를 측정할 수 있도록 분석기를 설계 제작하였다. 질량분해능은 10 ~ 30 정도로 높아서 다른 플라즈마 장치에 이용될 수 있다. 필요하다면 정전 에너지 분석기를 부착하여 질량분해능을 향상시킬 수 있다. Langmuir probe와 질량분석기로 측정된 플라즈마 전위를 보아 질량분석기도 플라즈마 전위를 측정하는 좋은 방법임을 알 수 있었다. 그리고 HC 방전과 ICP 방전에서 질소플라즈마의 이온구성비를 측정하였다.

### [참고 문헌]

- [1] J. R. Conrad, J. L. Radtke, R. A. Dodd, F. J. Worzala, and N. C. Tran, *J. Appl. Phys.* 62 (1987) 4591.
- [2] J. W. Coburn, *Thin Solid Films* 171 (1989) 65.
- [3] M. Zarrabian, C. Leteinturier, and G. Turban, *Plasma Sources Sci. Technol.* 7 (1998) 607.
- [4] B. Y. Tang, R. P. Fetherston, M. Shamin, R. A. Breun, A. Chen, and J. R. Conrad, *J. Appl. Phys.* 73 (1993) 4176.
- [5] E. Y. Wang, L. Schmitz, Y. Ra, B. LaBombard, and R. W. Conn, *Rev. Sci. Instrum.* 61 (1990) 2155.
- [6] M. Tuszewski, *Rev. Sci. Instrum.* 67 (1996) 2215.
- [7] I. D. Sudit and F. F. Chen, *Plasma Sources Sci. Technol.* 3 (1994) 162.
- [8] E. W. McDaniel, *Collision phenomena in ionized gases* (John Wiley & Sons, Inc., 1986) Chap. 6.
- [9] J. T. Gudmundsson, *Plasma Sources Sci. Technol.* 8 (1999) 58.
- [10] U. Kortshagen and M. Zethoff, *Plasma Sources Sci. Technol.* 4 (1995) 541.
- [11] E. Kawamura, V. Vahedi, M. A. Lieberman, and C. K. Birdsall, *Plasma Sources Sci. Technol.* 8 (1999) R45.
- [12] K. Suzuki, K. Nakamura, H. Ohkubo, and H. Sugai, *Plasma Sources Sci. Technol.* 7 (1998) 13.
- [13] V. A. Godyak, T. B. Piejak, and B. M. Alexandrovich, *Plasma Sources Sci. Technol.* 4 (1995) 332.