

오메가트론을 이용한 ECR 수소 플라즈마 내의 이온 검출

박정우⁰, 정희섭, 김근호*, 황기웅

서울대학교 전기공학과 * 한양대학교 물리학과

Detection of Ions in ECR H₂ Plasma Using Omegatron Mass Spectrometer

Jung-Woo Park, Heui Seob Jeong, Gon-Ho Kim*, and Ki-Woong Whang

Dept. of Electrical Engineering, Seoul National University

*Dept. of Physics, Han Yang University

Abstract

An omegatron mass spectrometer was designed and fabricated. Experiments have been performed to demonstrate the instrument's operation in the ECR plasma device. By using this analyzer, mass spectra have been obtained in hydrogen plasmas, and typical results are presented. In the plasma omegatron, downstream plasma generated by ECR are entering the analyzer through a small floating aperture. We employ a biasing technique to reduce the ion velocity along the magnetic field and to keep the ions from drifting to the side plates, and thus achieved improved ion collection and sensitivity. Mass spectra obtained show that main positive ion components are H₃⁺ and H₂⁺ with the density ratio of H₂⁺ to H₃⁺ ≈ 0.2.

1. 서론

질량 분석법은 화학 분석에 사용되고 있는 여러 가지 기기 분석법 중 가장 오래된 방법의 하나이다. 화학 분석에 있어서 질량 분석법의 우수성은 그 감도와 선택성에 있다. 자외선 분광법, 적외선 분광법 및 핵 자기 공명 분광법 등의 제반 분광법에 비해 질량 분석법은 그 감도가 뛰어나며 또한 그로부터 얻어지는 구조적 정보가 비교적 직접적이라는 장점을 갖고 있어, 기초과학적 측면에서 볼 때 질량 분석법은 이온의 구조와 반응을 연구하는 데 있어서 매우 중요한 방법이 된다. ECR 플라즈마에서 방전의 특성을 보다 잘 이해하기 위해 플라즈마 내에 존재하는 라디칼 및 이온의 종류를 알아내는 것이 중요하다. 방전 생성물에 대한 질량 분석법적 관측은 방전 플라즈마 내에서의 화학 반응에 관해 중요한 정보를 제공해 준다.

본 논문에서는, 오메가트론을 이용하여 ECR 수소 플라즈마 내에 존재하는 이온의 종류에 대한 in situ 측정의 결과를 기술한다.

2. 본론

(1) 오메가트론에 의한 질량 분석의 원리

오메가트론 질량 분석계의 동작 원리는 정자장과 수직 방향으로 인가된 시변 전장 내에서 이온들이 운동할 경우에 일어나는 이온들의 질량 분리에 기초를 두고 있다. 오메가트론을 양이온 측정에 응용함에 있어서, 플라즈마는 floating된 작은 구멍을 통해 자장을 따라 지나가게 된다. 그러면, 구멍을 빠져나온 양이온은 오메가트론, 내부에 인가된 횡방향의 RF

전장을 만나게 된다. 한편, 전자와 음이온은 아랫전극에 수집된다. 사이클로트론 공명의 결과로 이온의 분리가 일어나고, 질량 m_i 와 전하 Z_i 의 이온은 각주파수 ω 로 선회 운동을 하게 된다 : $\omega = ZeB/m_i$ (여기서, e 는 기본 전하이므로 B 는 자장이다.) 시변 전장의 주파수가 특정 이온의 사이클로트론의 주파수와 일치하여 공명을 일으킬 때 그 이온은 RF 에너지를 흡수하게 된다. RF 에너지를 흡수한 이온은 운동 에너지가 증가하며, 따라서 공명을 일으키지 않는 이온과는 달리 공전 궤도의 반경이 점차 커지게 되어, 중국에는 축에서 떨어져 위치한 콜렉터 전극에 도달한다. 즉, 콜렉터 전류의 피크는 사이클로트론 공명의 결과로 발생하는 것이고, 피크의 극성은 해당 이온의 전하의 부호에 따라 결정된다.

자장 B (단위는 Gauss)가 주어졌을 때, 검출된 이온 전류의 피크에 해당하는 실제의 공명 주파수는

$$f = 1.52 \times 10^3 ZB/M \text{ (Hz)} \text{ ----- (1)}$$

이다. 여기서, M 은 이온의 원자 단위 질량이다. 오메가트론의 분별능은 자장의 제곱에 비례하고, 식 $M/\Delta M = 4.8 \times 10^5 Zr_0 B^2/E_0 M$ 에 의해 주어진다. 여기서, r_0 는 질량 분석계의 중심에서 이온 콜렉터까지의 거리(단위는 cm)이고 E_0 는 고주파 전장의 세기 (단위는 cm)이다. 오메가트론을 플라즈마 분석에 이용할 경우, 당해 장치의 플라즈마 인접 표면에는 쉬쓰가 형성되고 따라서 구멍으로 들어온 이온을 자장 방향으로 가속시키게 된다. 그러므로, 자장 방향의 이온 속도를 줄이고 최대의 이온 수집을 위해 질량 분석계 내의 전극에 양의 전위를 인가시켜 준다 [1,2].

(2) 실험 장치 및 방법

1) ECR 및 오메가트론 장치 구성

이온 검출에 사용된 ECR-오메가트론 장치의 개략적인 모습을 그림1에 나타내었다. 제작된 반응조는 윗부분의 공진실과 아랫부분의 반응실로 이루어져 있다. ECR 조건을 만들어 주기 위한 자장은 3개의 코일에 의해 형성되며 전류를 조절함으로써 ECR layer의 위치를 변화시킬 수 있다. 사용된 가스는 수소이며 수소는 공진실을 통해 들어 가도록 되어 있다. 실험 압력은 50 - 60 mTorr이다.

질량 분석계의 전극 6개는 정육면체 모양(5cm × 5cm × 5cm)을 이루며 다음과 같이 구성된다:

- ① 구멍이 뚫린 top plate
- ② 집진된 bottom plate

- ③ front plate
- ④ back plate
- ⑤ 지항을 통해 접지된 콜렉터, 및
- ⑥ 2개의 side plate.

모든 전극과 콜렉터는 두께 0.3mm의 탄탈륨판으로 제작되었다. 오메가트론 내부의 압력은 반응실 쪽의 터보 분자 펌프와는 별도의 터보 분자 펌프를 써서 반응실에 비해 훨씬 낮게 유지하였다.

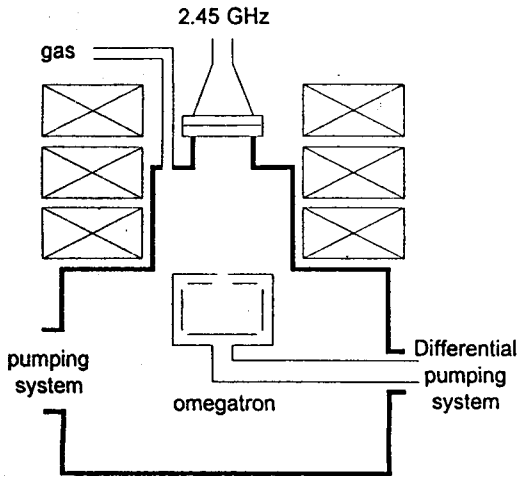


그림1. ECR 및 오메가트론 장치 구성

2) 제어 회로

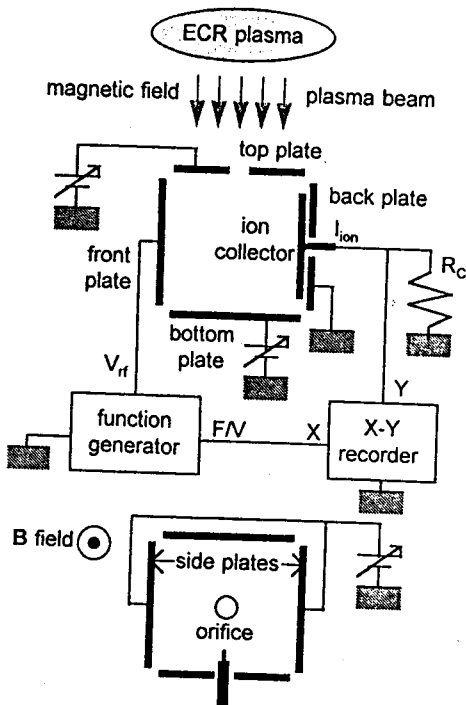


그림2. 제어 회로

그림 2에 제어 회로의 개략도를 보이고 있다. 함수 발생기에서 공급된 라디오 주파수의 여기 신호가 정육면체 모양의 전극 중 전·후 전극 간에 인가된다. 이 때, 오메가트론의 원리에 의해, 인가된 RF 전장의 주파수가 구멍을 통과한 여러 종류의 이온의 사이클로트론 주파수 중 어느 하나와 일치할 경우 그 일치된 이온의 공전 궤도 반경은 점점 증가하여 종국에는 콜렉터에 도달하게 된다. 따라서, 콜렉터 전류는 $\omega/2\pi$ 를 변화시키 갈 경우 하나의 피크를 이룬다. 전극에 인가되는 트래핑 전위는 고정된 RF 전장에 대해 피크의 크기가 최대치를 이루도록 조정된다.

3) 장비 내 자장 분포 모의 실험

그림3에 코일의 전류가 76A일 때의 자기력선과 ECR layer를 나타내었다.

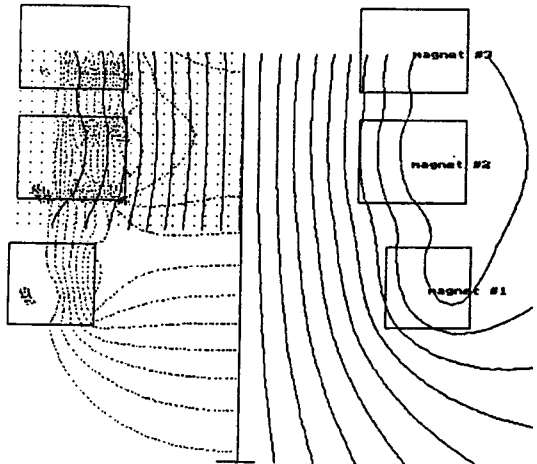


그림3. 인가 전류가 76A일때 시스템 내부의 자장분포(100 Gauss/lines)

(3) 실험 결과 및 검토

마이크로웨이브 파워는 400 ~ 450 W 이고, 보빈 전류는 76 A, 압력은 반응실 쪽이 58 mTorr이고 오메가트론 내부는 차동 펌핑에 의해 10^{-6} Torr로 유지하였다. 트래핑 전위는 0.9 V 로 잡았다. 함수 발생기의 스위칭 시간은 100초, 주파수 범위는 10 kHz 로부터 2 MHz 까지로 잡았으며, RF 전압의 진폭은 10.5 V 로 유지하였다. 이 경우 아랫 전극의 전위

가 -3 ~ -5 V 로 떨어짐을 확인할 수 있었다. 다만, 플라즈마의 떨림으로 인해 아랫 전극의 전위가 요동을 일으키고 이에 따라 콜렉터 전위도 심하게 변하므로 이것이 신호를 관측함에 있어서 상당한 노이즈를 야기하는 것으로 관측되었다.

오메가트론 분석계를 이용한 이온 종류 분석의 결과를 그림 4에 나타내었다. (407 Gauss < B < 539 Gauss) 오메가트론의 콜렉터 전위의 부호가 양이므로, 관측된 두 개의 피크는 양이온의 존재를 암시한다. 그러면, 각각의 신호가 어떤 이온의 공명에 기인한 것인가를 알아 보기로 한다. 두 가지 관점에서 이온 검출을 시도한다. 첫번째 접근에서는 전하 대 질량비 즉, Z/M 에 초점을 맞추고, 두번째 접근에서는 공명 주파수의 비를 비교하는 간접적인 방법을 쓰기로 하겠다.

우선, 측정에 의하면 첫째 신호에 대응하는 주파수는 225.78 kHz 이고, 둘째 신호에 대응하는 주파수는 345.66 kHz 이다. 본론 (1)절의 식 (1) 에서 Z/M 를 구해 보면

$$Z/M = f[\text{kHz}] / (1.52 * B[\text{Gauss}])$$

이다. 그런데, ECR 내부의 자장 분포는 위에서 아래로 하강함에 따라 보다 불균일해지고 자장의 세기는 약화된다. 실제로, 가우스메타를 써서 측정 한 바에 의하면 오메가트론의 윗 전극이 위치한 부분의 자장값은 539 Gauss 이고, 아랫전극이 위치한 부분의 자장값은 407 Gauss 인 것으로 확인되었다. 따라서, 오메가트론 내부의 자장은 그 사이값을 취한다고 생각해야 한다. 이에 대응하여, Z/M 도 양 극단값을 취하게 되고 따라서 오메가트론 내부에서 공명을 일으킨 이온의 정확한 Z/M 의 값은 양 극단값의 사이에 위치한다고 추정하는 것이 타당하다. 그래서, 각 신호에 대응하는 주파수의 경우에 Z/M 의 양 극단값을 계산하였다. 그 결과 225.78 kHz 의 경우는 Z/M 의 최소값이 0.28 이고 최대값이 0.36 으로 계산되었고, 345.66 kHz 의 경우는 Z/M 의 최소값이 0.42 이고 최대값이 0.56 으로 계산되었다. 그런데, H₂⁺ 의 Z/M 값은 1/3 = 0.33 으로서 225.78 kHz 의 경우의 양 극단값 사이에 존재하고, H₂⁺ 의 Z/M 값은 1/2 = 0.5 으로서 345.66 kHz 의 경우의 양 극단값 사이에 존재한다.

다음으로, H₂⁺ 와 H₃⁺ 의 공명 주파수의 비는 계산에 의하면 1.5 인데 실험에서 얻은 타이타삼의 두 시그널에 대응하는 각 주파수의 비를 측정해 본 결과 345.66 / 225.78 = 1.53 이므로 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

따라서, 이상의 두 가지 논의로부터 첫째 신호와 둘째 신호는 각각 H₃⁺ 와 H₂⁺ 의 공명에 기인하는 것임을 추론할 수 있다. 그림 5에는 피크 크기의 트래핑 전위에 대한 의존성을 나타내었다. 트래핑 전위가 0.9 V 일 때 피크의 크기가 최대가 됨을 볼 수 있다. 트래핑 전위를 0 V 에서부터 증가시키에 따라 피크의 크기가 서서히 커지다가 0.9 V 에서 최대가 되고 그 이상의 범위에서는 트래핑 전위가 증가할 때 오히려 피크의 크기가 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한, 이 타이타에서 신호의 분별능도 트래핑 전위가 0.9 V 이상으로 커짐에 따라 점점 악화되다가 트래핑 전위가 3 V 를 넘어서면 분별능이 현저히 나빠지는 것을 볼 수 있다. 그림6에는 신호의 보빈 전류에 대한 의존성을 나타내었다. 보빈 전류가 76 A 일 때 신호의 피크 크기가 가장 크다는 것을 알 수 있다. 보빈 전류가 86 A 일 때는 노이즈가 갑자기 증폭되어 나타남으로 인해 신호를 알아 볼 수 없을 정도가 됨을 볼 수 있는데, 이는 보빈 전류가 증가함에 따라 ECR 공명층이 점점 하강하다가 86 A 에서는 ECR 공명층이 윗전극보다 아랫쪽에 위치하게 되기 때문인 것으로 추정된다. 스펙트럼에서 피크 크기의 비는 각 타이타에서 0.18, 0.16, 0.20 으로 측정되었다. 이로

부터 H₂⁺ 와 H₃⁺ 의 밀도비는 약 0.2인 것으로 추정된다.

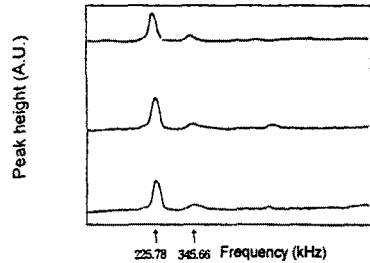


그림4. 전형적 실험 조건에서의 신호 모양

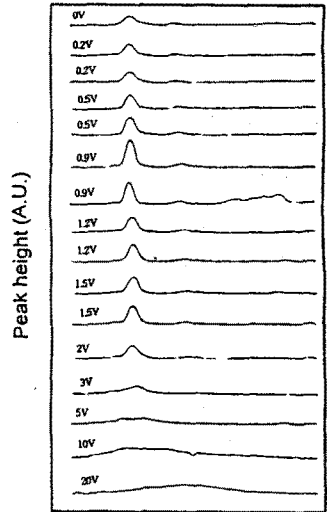


그림5. 피크 크기의 트래핑 전위에 대한 의존성

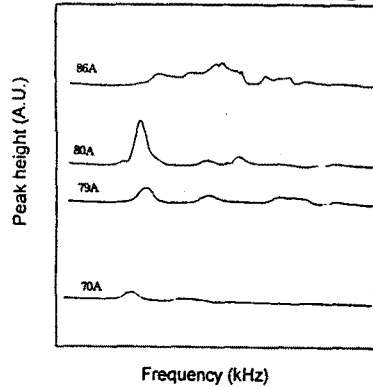


그림6. 신호의 보빈 전류에 대한 의존성

3. 결론

ECR 수소 플라즈마 내에서 이온의 종류 분석에 대한 in situ 측정을 시도하였다. 오메가트론 질량 분석계로부터 얻어진 결과는, 주요 양이온 성분은 H₂⁺ 와 H₃⁺ 이고 H₂⁺ 와 H₃⁺ 의 밀도비는 약 0.2 임을 분명하게 암시하고 있다. 이상의 결과는 수소 플라즈마의 특성을 상세하게 연구하는데 유용할 것으로 본다.

참고 문헌

- 1.E.Y.Wang, L.Schmitz, Y.Ra, B.LaBombard, and R.W.Conn, Rev.Sci.Instrum.61,2155 (1990)
- 2.H.Sommer et al.,Phys.Rev.82,697 (1951)