



&lt;연구논문&gt;

한국표면공학회지  
J. Kor. Inst. Surf. Eng.  
Vol. 47, No. 1, 2014.

<http://dx.doi.org/10.5695/JKISE.2014.47.1.053>

## 지뢰탐지를 위한 ECR 플라즈마에서 타깃에 고전압 DC 펄스 인가시 전압-전류 특성 분석

김성봉<sup>a\*</sup>, 이희재<sup>b</sup>, 박승일<sup>a</sup>, 유석재<sup>a</sup>, 조무현<sup>b</sup>, 한승훈<sup>c</sup>, 임병욱<sup>c</sup>

<sup>a</sup>국가핵융합연구소 플라즈마기술연구센터, <sup>b</sup>포항공과대학교 물리학과, <sup>c</sup>삼성탈레스 ISR/PGM 연구소

### I-V Characteristics of Negatively DC Pulsed Target in ECR Plasma for Landmine Detection

Seong Bong Kim<sup>a\*</sup>, Hui Jea Lee<sup>b</sup>, Seungil Park<sup>a</sup>, Suk Jae Yoo<sup>a</sup>, Moohyun Cho<sup>b</sup>,  
Seung-hoon Han<sup>c</sup>, Byeongok Lim<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Plasma Technology Research Center, Gunsan 573-540, Korea

<sup>b</sup>Department of Physics, Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784, Korea

<sup>c</sup>Samsung Thales, Yongin 449-885, Korea

(Received February 17, 2014 ; revised February 21, 2014 ; accepted February 24, 2014)

#### Abstract

I-V characteristics of a cylindrical target in an ECR plasma were studied for sheath spatial evolutions when the target was pulsed biased to a high negative potential. The magnetic field effects on sheath thickness and sheath boundary speed were investigated by comparison between the experimental results and the theoretical results using the Child-Langmuir sheath model. The results showed that the magnetic field suppressed electron motion away from the target so that sheath thickness and sheath boundary speed decreased.

*Keywords* : ECR plasma, High voltage pulse

## 1. 서 론

펄스는 스퍼터, 식각, 박막 표면 개질 등 다양한 플라즈마 공정에 활용되고 있다. 특히 고전압 펄스는 박막에 이온 주입을 함으로써 박막 개질에 널리 사용되고 있다. 또한, 50 kV 이상의 고전압 펄스는 핵융합 반응을 이용한 중성자 발생에 활용되고 있다. 고전압 펄스에 의해서 가속된 중수소 이온이 중수소 또는 삼중수소 흡착 타깃에 입사하면 중수소-중수소 핵융합 또는 중수소-삼중수소 핵융합이 일어나며 이 때 중성자가 발생한다. 이와 같은 원리를 이용한 중성자 발생원은 2가지 유형이 있다. 하나는 플라즈마 발생원에서 전극 또는 그리드를 이

용하여 이온을 인출한 후 타깃에 입사시키는 빔-타깃 방식이다<sup>1-3)</sup>. 다른 하나는 고전압 펄스를 타깃에 직접 인가하여 플라즈마 쉬스를 이용하여 이온을 가속시켜 타깃에 충돌시키는 플라즈마-타깃 방식이다. 빔-타깃 방식의 중성자 발생원은 상용 제품이 있을 만큼 이미 기술의 완성도가 이루어진 반면, 플라즈마-타깃 방식의 중성자 발생원은 개발 초기 단계이다. 플라즈마-타깃 방식의 중성자 발생원에서 타깃에 고전압 펄스를 인가할 때 플라즈마 특성은 플라즈마 잠입 이온주입방법(Plasma Immersion Ion Implantation)과 유사한 특성을 가진다. 하지만 중성자 발생원은 다양한 목적을 위해서 차량에 탑재할 수 있도록 소형으로 제작할 필요가 있는데, 플라즈마 잠입 이온주입방법의 대형 플라즈마 발생원을 중성자 발생원에 그대로 적용하는 것은 어렵다. 일

\*Corresponding author. E-mail : sbkim@nfri.re.kr

반적인 플라즈마 잠입 이온주입방법에서 고전압 펄스를 인가하면 펄스 상승 시간 동안 플라즈마 쉬스 경계 속도가 증가하여 최소한 플라즈마 쉬스 경계가 이동한 거리 이상의 길이의 플라즈마 발생원이 필요하게 된다. 또한, 플라즈마 쉬스 경계 속도의 급격한 증가는 타깃 전류의 급격한 증가의 원인이 되고 타깃의 최대 순간 전류의 크기가 증가할수록 펄스 전원 장치의 사양도 증가하기 때문에 전원 장치 가격도 상승하는 단점이 있다. 따라서 플라즈마-타깃 방식의 중성자 발생원은 고전압 펄스 인가할 때 펄스 상승 시간에 플라즈마 쉬스 경계 속도의 증가를 최소화 시켜야 한다. 이와 같은 목적을 달성하기 위해서 ECR 플라즈마에서 타깃에 고전압 펄스를 인가한 후 타깃의 전압-전류 특성을 연구하였다.

### 2. 실험

실험 장치는 그림 1과 같고 ECR 플라즈마 발생원, 진공 시스템, 마이크로파 시스템, 고전압 펄스 전원 장치로 이루어져 있다. ECR 플라즈마 발생원은 ECR 자기장을 위한 벨트형 영구자석 구조물, 마이크로파를 입사시키는 slit antenna, 원통형 진공 용기로 구성된다. 벨트형 영구자석 구조물은 방위 각 방향으로 대칭인 자기장을 발생시키며, 진공 용기 내벽에서 3000 Gauss 이상의 자기장과, 진공 용기 벽에서 약 40 mm 떨어진 곳에 875 Gauss의 공명 자기장을 형성한다. 이와 같은 자기장의 구조는 원통형 타깃에 고전압 펄스를 인가할 경우 전자가 진공용기 중심에서 내벽 방향으로 운동하는 것을 방해하여 플라즈마 쉬스 경계의 속도를 감소시키는

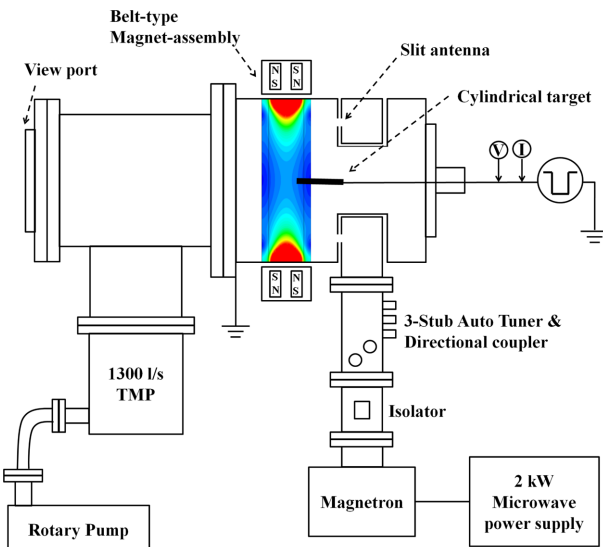


Fig. 1. Experimental setup.

역할을 한다. 마이크로파 입사 장치는 도넛 형태의 직사각형 도파관에 슬릿을 만든 slit antenna로 875 Gauss 공명 자기장과 마이크로파 전기장이 수직이 되도록 설계되었다. 진공 시스템은 로터리 펌프, 1300 l/s 터보분자펌프로 이루어져 있고, 공정 압력은 진공 게이지로 측정하였고 전자식 가스 유량 조절 장치 (mass flow controller)로 조절하였다. 기저 압력은  $3 \times 10^{-7}$  Torr, 공정압력은 0.1~1 mTorr( $H_2$  gas)이다. 마이크로파 시스템은 2 kW 마이크로파 전원 장치, 마그네트론, isolator, auto tuner로 구성되며 auto tuner로 마이크로파 임피던스 매칭을 함과 동시에 마이크로파 전력을 측정하였다. 모든 실험에서 마이크로파 전력은 600 W이다. 고전압 펄스 장치의 사양은 1~40 kV 전압, 4~10 us 펄스 폭, 1~2000 Hz 펄스 주파수이며, 펄스 전압은 1000:1 프로브, 타깃의 전류는 변류기(current transformer)로 측정하였다. 원통형 타깃은 지름 6 mm, 길이 80 mm 이다.

### 3. 결과 및 고찰

자기장이 없을 경우, 원통형 타깃에서 인가전압  $V_0$  와 플라즈마 쉬스 경계의 속도  $dr/dt$ 와의 관계는 식 (1)과 같다<sup>4)</sup>. 여기서  $r_t$ 는 타깃 반지름,  $n$ 은 전자 밀도,  $M$ 은 수소 이온 질량이다.

$$J = \frac{4}{9} \epsilon_0 \left( \frac{2e}{M} \right)^{1/2} \frac{V_0^{3/2}}{r_t r \beta^2} = en \frac{dr}{dt} \tag{1}$$

그림 2는 타깃에 -1~-20 kV 전압( $V_0$ ), 10 us 펄스폭으로 인가한 펄스 모양이다. 시간에 따른 펄스 전압을 식 (1) 좌변에 대입하면 자기장이 없을 경우 플라즈마 쉬스 두께 및 플라즈마 쉬스 경계 속도를 이론적으로 구할 수 있다.

수소 0.5 mTorr 공정 압력에서 ECR 플라즈마를

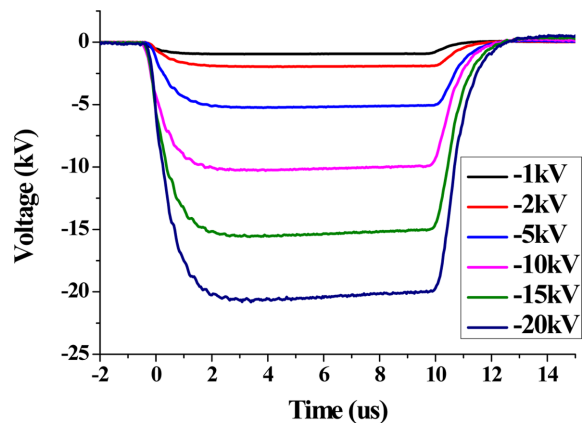


Fig. 2. Negative pulse waveforms.

방전시킨 후, 타깃에 그림 2와 같은 펄스 전압을 인가했을 경우 타깃 전류 파형이다. 자기장이 있는 경우의 쉬스 모델은 이론적으로 구하기 어렵기 때문에 실험에서 얻은 시간에 따른 전류 파형과 식 (2)를 이용하여 플라즈마 쉬스 두께 및 플라즈마 쉬스

경계 속도를 실험적으로 구할 수 있다. 여기서  $I(t)$ 는 타깃 전류,  $h$ 는 타깃 길이이고, 원형 타깃 단면의 플라즈마 쉬스 팽창은 무시하였다.

$$I(t) = en(2\pi(r_t+r)h)\frac{dr}{dt} \quad (2)$$

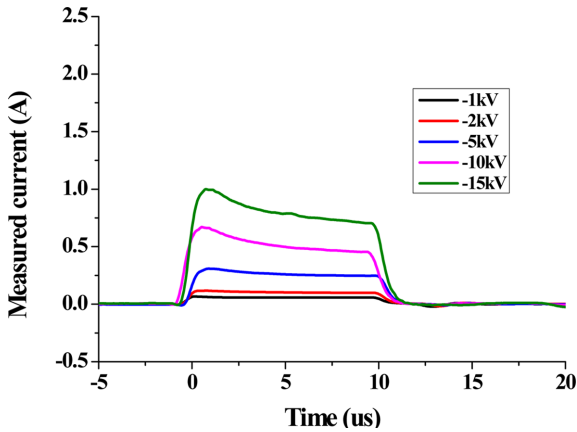


Fig. 3. Typical current waveforms.

그림 4-6은 공정 압력이 0.1 mTorr, 0.5 mTorr, 1 mTorr 변화함에 따라 플라즈마 쉬스 두께의 이론값과 실험값을 비교한 것이다. 모든 압력, 전압 조건에서 실험값이 이론값보다 작은 경향을 나타내는데 이는 자기장이 전자의 운동에 영향을 미쳐 쉬스의 팽창을 억제하기 때문이다. 또한, 공정 압력이 증가할수록 쉬스 두께가 감소함을 알 수 있다.

그림 7은 -10 kV 펄스 인가시 공정 압력에 따른 플라즈마 쉬스 경계 속도의 이론값과 실험값을 비교한 것이다. 펄스 상승 시간 동안 이론값의 플라즈마 쉬스 경계 속도가 실험값의 2배 이상임을 알 수 있고 압력이 증가할수록 그 차이가 더 커짐을 알 수 있다. 펄스 상승 시간 동안 자기장이 급격한 전압의 변화에 따른 전자의 운동을 억제하여 플라

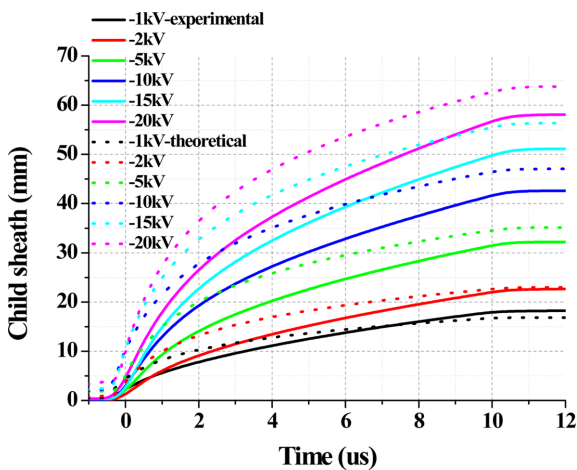


Fig. 4. Sheath thickness at 0.1 mTorr of hydrogen.

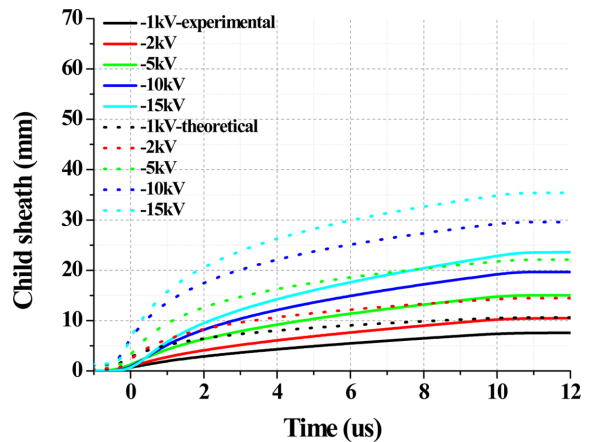


Fig. 6. Sheath thickness at 1 mTorr of hydrogen.

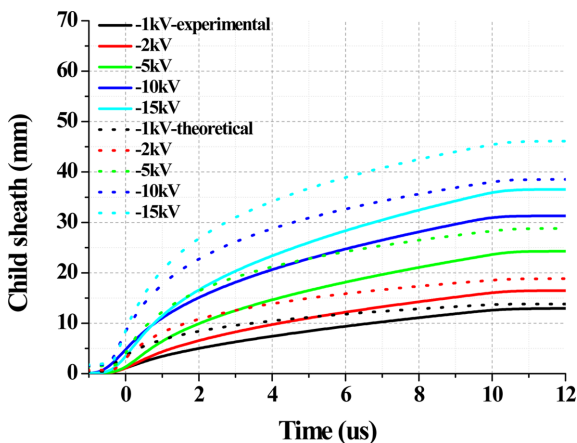


Fig. 5. Sheath thickness at 0.5 mTorr of hydrogen.

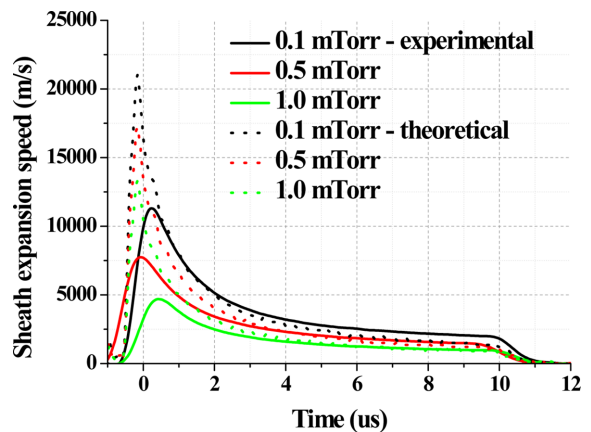


Fig. 7. Sheath expansion speed at -10 kV pulse.

즈마 쉬스 경계 속도를 감소시킨다. 또한, 압력의 증가는 전자와 가스의 충돌을 증가시켜 플라즈마 쉬스 경계 속도를 감소시킨다.

#### 4. 결 론

벨트형 자석 구조물과 slit antenna으로 구성된 ECR 플라즈마에 원형 타깃을 위치시키고 고전압 펄스를 인가한 후 전압-전류 특성을 분석하였다. 벨트형 자석 구조물에 의한 자기장은 방사 방향으로 대칭이고 중심에서 내벽 방향으로 갈수록 자기장의 세기가 증가하기 때문에 타깃에서 내벽 방향으로 향하는 전자의 운동을 방해하고 그 결과 고전압 펄스 인가시 플라즈마 쉬스 경계 속도를 감소시킨다. 자기장이 없을 경우 플라즈마 쉬스 두께 및 플라즈마 쉬스 경계 속도의 이론값과 자기장이 있는 경우 실험값을 비교하여 이와 같은 사실을 뒷받침하였다.

#### 후 기

본 논문에 포함된 연구는 방위사업청 및 국방과학연구소의 지원으로 삼성탈레스 관리하여 핵심기술 연구개발 사업(과제번호 UC120055ID & 8580011638)의 일환으로 국가핵융합연구소와 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### References

1. K. N. Leung *et al.*, Rev. Sci. Instrum., 62 (1991) 100.
2. J. Reijonen, K. N. Leung, G. Jones, Rev. Sci. Instrum., 73 (2002) 934.
3. S. Hahto *et al.*, Rev. Sci. Instrum., 76 (2005) 023304.
4. M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, Principles of Plasma Discharges and Materials Processing (2005).