

유한 오름 시간을 갖는 음전위 펄스에서 시변환 플라즈마 덮개의 거동 연구

김곤호 · 김영우 · 김건우 · 한승희* · 홍문표**

한양대학교 물리학과

*한국과학기술연구원 특성 분석 센터

**삼성전자 AMLCD 사업부

(1999년 2월 24일 접수)

Measurement of time-dependent sheath for the negative voltage pulse with a finite rise time

Gon-Ho Kim, Young-Woo Kim, Gun-Woo Kim, Seunghee Han* and Mun-Pyo Hong**

Department of Physics, Hanyang University-Ansan

*Advanced Analysis Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

**AMLCD Division, Samsung Electronics, Yongin-si, Kyunggi-do, Korea

(Received February 24, 1999)

요 약 - 플라즈마 이온주입에서 유한한 고유 오름 시간을 갖는 음전압이 펄스 형태로 평면 타겟에 인가될 때 타겟 주위로 형성되는 시 변환 플라즈마 덮개(time dependent sheath)를 관찰하였다. 이때 형성되는 시 변환 플라즈마 덮개는 서로 다른 특성을 갖는 두 개의 영역으로 구성되어 있음이 관찰되었다. 펄스 오름 시간동안에 형성되는 플라즈마 덮개는 플라즈마 밀도의 역수와 펄스 오름 비율의 루트에 비례하고 펄스 시간의 루트에는 비례하며 이온 질량에 관계없이 진행되는 이온 매트릭스 덮개의 전개가 관찰되었으며 펄스 오름 시간 이후에는 이온의 음속도에 비례하는 동적 플라즈마 덮개의 전개가 관찰되었다.

Abstract - It was observed that the time-dependent sheath which was formed around the planar target biased by negatively voltage pulse with a finite rise time in the plasma source ion implantation. Results show that the time-dependent sheath consisted of two parts: the ion matrix sheath development during the pulse rise time and the dynamic sheath motion after attaining the full pulse. The ion matrix sheath development which is in proportion to square root of the pulse time and the pulse rise rate over the plasma density but independent of the ion mass. The dynamic sheath propagates with approximately the ion sound speed.

1. 서 론

물질 표면 층을 효율적으로 개질할 수 있는 신기술로 플라즈마 이온 주입 방법(Plasma Source Ion Implantation: PSII)이 개발되고 있다[1, 2]. 현재 사용되고 있는 선형 가속기에서 가속된 이온빔을 이용하는 이온빔 주입 기술과는 달리 플라즈마 이온주입에서는 타겟을 플라즈마 속에 넣고 음 전압을 인가함으로써 타겟 주변에 형성되는 전기장에 의하여 플라즈마 이온을 가속시켜 타겟에

이온을 주입하게 된다. 그 결과 불규칙한·모양을 가진 타겟 표면도 균일하게 이온을 주입시킬 수 있는 장점을 갖고 있으며 대면적 시료를 처리할 수 있어 금속 도체, 폴리머 등의 부도체 및 반도체의 이온주입장치로의 응용 등을 위한 PSII 연구는 매우 활발하다[1].

플라즈마 이온주입에서는 10~100 kV의 음전압 펄스가 타겟에 인가됨에 따라 타겟 주위의 전자들은 전자 플라즈마 진동수의 역수($1/\omega_{pe}$)의 시간 내에서 전기장이 형성되는 공간으로부터 떠나게 되고 이온만이 남아있는

이온 매트릭스 덮개(ion matrix sheath)가 형성되게 된다 [1]. 펄스의 시간이 지나감에 따라 플라즈마 덮개(plasma sheath) 안에 있던 이온들은 형성된 전기장을 따라 가속되어 이온 플라즈마 진동수의 역수($1/\omega_{pi}$)의 시간대에 타겟 쪽으로 가속되며 주입된다. 펄스가 유지되는 동안 덮개 내의 가속된 이온들은 계속 주입하게 되며 플라즈마 덮개 전기장이 플라즈마 내로 진행되어 플라즈마 덮개의 경계는 타겟으로 부터 멀어지게 된다. 이 같이 시간에 따라 변하는 플라즈마 덮개를 시변환 플라즈마 덮개(time transient sheath)라 하며 이러한 플라즈마 덮개의 특성은 이온 플라즈마 진동시간($1/\omega_{pi}$)보다 긴 시간 후에 최종적으로 안정된 상태의 일반적인 Child-Langmuir 덮개가 된다. 따라서 시변환 플라즈마 덮개에 대한 연구는 PSII에서 이온을 타겟에 효율적으로 주입하기 위하여 필수적으로 플라즈마 이온주입에 대한 시변환 플라즈마 덮개의 실험적[3], 수치적 연구들은[4] 주로 주입되는 이온들이 시간에 따라 변하는 주입되는 전류, 표면에 주입되는 총 이온의 양, 이온 에너지 분포를 결정하기 위해서 발전되어 왔다[3, 4]. 이 모델들은 펄스의 오름 시간이나 내림 시간이 없고 플래토 시간만 존재하는 전술한 경우와 같은 직사각형(구형파) 형태의 인가 전압이 평면 타겟에 인가된다고 가정하여 펄스 인가와 동시에 이온 매트릭스 덮개가 형성된다고 가정하였다. Shamim 등은[3] 구형파 원통형 타겟에 대하여 펄스의 플래토 시간동안 플라즈마 덮개의 진행에 관한 실험적 관찰을 수행하였으며 플라즈마 덮개의 진행 속도가 이온의 음속도(ion sound speed)에 비례함을 관찰하고 이 결과를 전산 모델과 비교하였다[3].

실제 PSII에서는 인가되는 펄스는 펄스 발생 장치가 갖는 고유 RC 시간으로 인해서 유한한 오름 시간과 내림 시간을 갖는 역 사다리꼴 형태의 펄스가 타겟에 인가되게 된다[5]. 따라서 실제 인가되는 펄스에서 펄스의 오름 시간과 내림 시간이 갖는 비율은 무시할 수 없게 되며 이러한 조건에서 시편 앞에 형성되는 플라즈마 덮개의 반응에 관한 고찰이 요구된다. Stewart와 Lieberman은[4] 이런 사다리꼴 형태의 인가 펄스에 대하여 타겟 경계 면에서 형성되는 시 변환 플라즈마 덮개 모델을 제시하였다. 이들은 펄스 오름 시간동안 이온 매트릭스 덮개가 형성되고 이때 덮개의 경계 면을 통과하는 이온 전류 밀도는 Child 전류를 만족하며 진행된다고 가정하였다. 그러나 대부분의 플라즈마 이온주입 장치에서 사용되는 펄스의 오름 시간 크기는 대략 $10 \text{ kV}/\mu\text{s}$

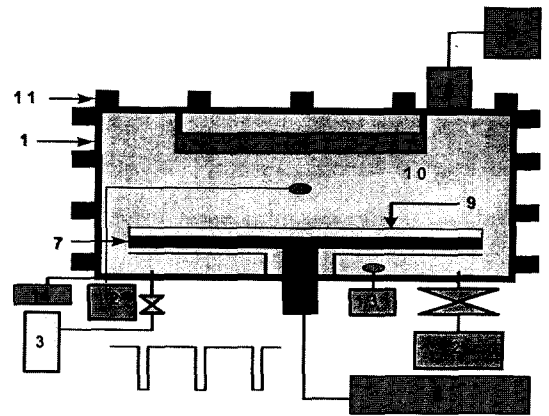


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup. [1. Vacuum chamber, 2. Turbo Molecular pump, 3. Gas delivery system, 4. Antenna (two half turn 25 cm dia.), 5. RF matching box, 6. RF generator (13.56 MHz, 600w), 7. S ample stage, 8. HV pulse generator, 9. Stainless steel target (10cm dia.) 10. Plasma, 11. Permanent magnets, 12. Langmuir probe, 13. Pressure ion gauge, 14. Chamber ground].

의 크기를 갖으며 수 eV의 전자 온도를 갖고 있어 이들 전자 온도에 상응하는 타겟 전위 변화는 단지 수 피코 세컨드(pico second) 이내 즉, 전자 플라즈마 진동시간 내에서 이루어 질 것이다. 이는 타겟 펄스의 증가가 이온의 반응시간에 비해 빠르게 변화함으로써 펄스의 오름 시간동안에 덮개 경계주변의 이온들이 Child 전류를 형성하며 덮개 내로 유입되기는 어려울 것이다. 또 다른 가정으로는 타겟 주변의 전자들이 펄스 오름 시간동안 계속해서 타겟으로 부터 계속 멀어지면서 매 순간 형성되는 이온 매트릭스 덮개가 점차 확장되는 경우로 가정할 수 있을 것이다(Fig. 3참조). 이와 같이 현재 제시된 모델에 관한 의문이 있으나 실제 PSII 펄스 형태와 유사한 조건의 오름 시간과 내림 시간을 갖는 인가 전압 조건에서 플라즈마 덮개에 관한 실험적 결과는 아직 보고된 바 없다. 따라서 본 실험에서는 실제 PSII에 사용되는 이온들의 거동을 이해하기 위하여 오름 시간을 갖는 펄스가 인가에 따른 타겟 주변에서 형성되는 시변환 덮개의 거동을 직접 관찰하며 개발된 이온 매트릭스 덮개 전개 모델과 비교 분석하였다[7]. 이들 덮개의 거동에 관한 연구결과는 시편에 유입되는 이온 전류의 특성 파악에 활용할 수 있을 것이며 최근 김 등이[8] 수행한 사다리꼴 인가 전압에 대한 시편에 유입되는 이온 전류 파형의 해석 결과 분석에도 사용될 수 있다. 보다 면밀한 주입 이온의 양에 대한 분석을 위하여 시편 깊이에

따른 주입 이온의 분포 측정이 요구되며 본 연구에 이어 이에 대한 연구가 진행되고 있으므로 주입 이온의 양에 관한 결과는 다음 논문에서 언급하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

플라즈마 이온주입(plasma source ion implantaion : PSII) 실험이 수행된 장치는 KIST에 설치되어 있으며 개략도는 Fig. 1과 같고 관련 논문에서[5, 6] 구조가 상세하게 기술되어 있다. PSII 장비에서 타겟에 인가되는 음전압 펄스는 펄스 발생기와 조절기로 구성된 고전압 펄스 장치에 의해서 발생되며 펄스의 오름 시간과 크기를 조절하였다. 스테인레스 스틸(SUS 304)로 만들어진 직경 50 cm, 높이 56 cm의 원통형 반응기 내에 설치된 두 개의 half turn을 연결한 1 turn 형태의 직경 25 cm의 원형 안테나(Al_2O_3 으로 표면처리)에 13.56 MHz의 rf를 인가하여 유도 결합형 플라즈마를 발생하였다. 펄스가 인가되는 타겟은 직경 10 cm의 평면 스테인레스 스틸 원반을 사용하였으며 타겟은 안테나로부터 23 cm에 설치하였다. 발생된 플라즈마의 구속을 위하여 용기의 주변에는 영구자석 set 20개로 구성된 magnetic bucket을 이용하였으며 이온주입시 발생하는 X선 차폐를 위하여 1 mm 두께의 납 벽을 용기주변에 설치하였다. 정전 탐침은 측면 및 반응기 하단으로부터 타겟 표면에 수직방향으로 위치를 조절할 수 있도록 설치하였고 타겟과 마주하는 단면을 사용하는 0.635cm 직경의 Ta 평판 탐침을 사용하였다. 플라즈마 발생은 단일 이온을 형성하는 아르곤 개스를 이용하여 1 mtorr의 운전 압력 및 200W의 rf power에서 실험을 수행하였다.

이 실험에서 펄스 오름 시간을 20 kV일 때 2, 4 및 6 μs 로 변화하고 펄스 오름 시간율(펄스크기에 대한 펄스의 완성 시간 비율: pulse rise rate)을 3.3에서부터 10 kV/ μs 까지 변화하였으며 크기가 10~40 kV의 음전위를 갖는 펄스를 사용하였다. 실험에서는 밀도 $\sim 5 \times 10^{19} cm^{-3}$, 전자온도 4 eV인 아르곤 플라즈마가 사용되었다.

타겟에 인가된 펄스 전압은 전압 분할기를 이용하여 측정하였으며 Shamim의 실험에서와[3] 같이 Langmuir 탐침을 플라즈마 변수들과 플라즈마 덮개(sheath)의 전개 측정에 사용하였고 탐침에는 +40 V의 전압을 가하여 얻어지는 전류 값을 관찰하였다. 탐침은 음전압이 인가된 타겟으로부터의 arc를 피하기 위해서 2 cm부터 15 cm까지 변화시켜가면서 측정하였다. 타겟 전압을

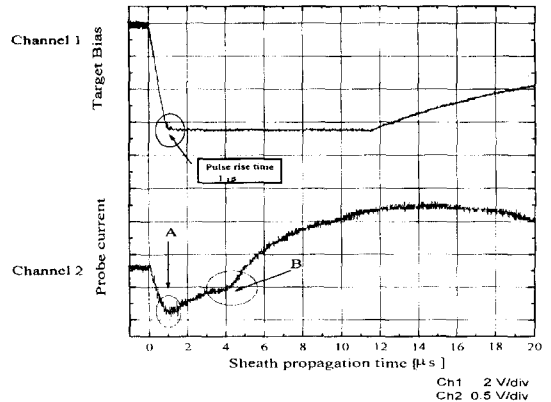


Fig. 2. A typical oscilloscope trace for detection of the propagation sheath edge. Channel 1 is the bias voltage on the target. Channel 2 is the electron current of Langmuir probe biased at +40V. The electron current is constant before the bias is applied, but after the bias is applied, the current increases (point A). When the sheath reaches the probe (point B), the electron current decreases, eventually approaching zero.

trigger 신호로 사용하고 오실로스코프에서 시간 변화에 따른 전자 전류 변화를 측정하여 Fig. 2와 같은 신호를 얻을 수 있었다. Fig. 2에서처럼 채널 1은 타겟에 주어진 전압을 보여주며(10 kV의 펄스, 1 μs 의 오름 시간) 채널 2는 Langmuir 탐침에서 얻어진 전류 파형을 나타낸다. 채널 2에서는 펄스 오름 시간동안에 나타나는 A점과 펄스 오름 시간 후, 펄스 플래토 시간에 나타나는 B점 등의 두 개의 명확한 변곡점을 갖는다. 펄스 오름 시간동안 타겟 펄스는 시간에 따라 점차 큰 음의 값을 갖게 됨으로 타겟으로부터 멀어지는 전자들의 흐름이 탐침에 먼저 측정되고 이때 형성되는 전자의 흐름으로 인해 탐침에는 급격한 음 전류 신호가 측정되게 된다. 펄스 오름 시간동안에 계속 음 전류의 값이 증가하고 이들 전자 흐름이 탐침을 지나치게 되면 탐침 주변의 이온들이 탐침으로 유입되어 탐침에 흐르는 전류 크기에는 변화가 생기며 이점은 채널 2의 A점에 해당한다. 따라서 A점은 펄스 오름 시간 내에 전개되는 이온 매트릭스 덮개(ion matrix sheath)의 경계면에 상응하게 되며(다음절 참조) 펄스가 안정화되었을 때 즉, 펄스의 플래토 시간 내에서 이온 매트릭스 덮개의 전개(ion matrix development)가 끝나고 완성된 매트릭스 덮개가 시간에 따라 진행되는 이때 진행되는 플라즈마 덮개 동적인 변화(dynamic sheath motion)는 그 경계가 탐침을 지나치면 탐침에는

플라즈마 덮개 내의 양이온들의 유입으로 탐침의 음 전류 값은 더욱 감소하고 채널 2의 B점과 같은 전류곡선이 나타난다. 탐침의 위치를 이동하여 계속해서 얻는 점 A와 B로부터 타겟 주변에 형성되는 덮개 경계의 시간과 위치에 따른 특성을 관찰할 수 있었다.

3. 펄스 오름 시간동안 전개되는 이온 매트릭스 덮개 모델

Fig. 3에서는 펄스 오름 시간동안의 시변환 플라즈마 덮개의 거동에 대한 새로운 모델을 보여주고 있다. Fig. 3에서 오름 시간동안 펄스는 $1/\omega_{pe}$ 미만의 짧은 시간에 형성되는 몇 단계의 스텝 펄스의 모임으로 가정한다. 스텝 펄스가 인가되면(t_1) 시편 앞에는 이온 매트릭스 덮개가 형성되고(S_1) 다음 펄스 스텝에서는(t_2) 직전의 이온 매트릭스 덮개 경계면 S_1 에 이어 새로운 매트릭스 덮개가 전개되어($S_2 + S_1$)의 크기를 갖으며 펄스 오름 시간 t_r 동안에 이온 매트릭스 덮개 전개 거리(thickness of ion matrix sheath development)는 각 스텝 펄스시간에 형성된 이온 매트릭스 덮개의 합으로 나타낼 수 있을 것이다. 이 때 펄스 오름 시간동안 타겟에 인가되는 펄스는

$$V(t) = \frac{V_{ot}}{t_r} \quad 0 < t < t_r \quad (1)$$

이라 하고 타겟 주변의 전자는 펄스 인가와 함께 타겟

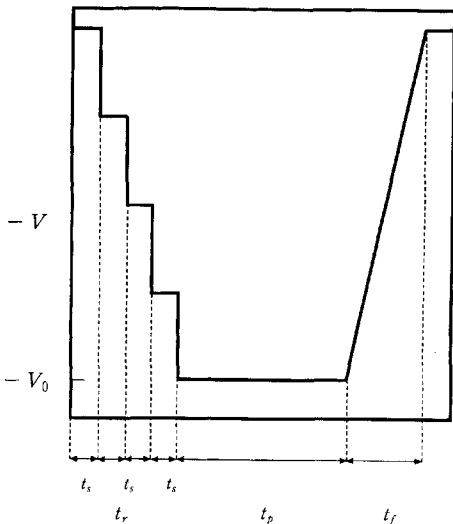


Fig. 3. Applied voltage wave form of our model. t_s is successive step pulse rise time, t_r is pulse rise time, t_p is plateau time and t_f is pulse fall time.

주변을 멀리 떠나 이온만을 고려한 포이즌 방정식

$$\nabla^2 V(t) = -\frac{en_0}{\epsilon_0} \quad (2)$$

을 이용하여 공간 내에 형성되는 전위 분포를 구할 수 있다. 여기서 t_r 은 펄스 오름 시간, n_0 는 플라즈마 덮개 경계 면에서의 bulk 플라즈마 밀도(여기서는 presheath에 의한 영향을 고려하지 않았다), ϵ_0 는 진공중의 유전 상수 및 e 는 전하량이다. 따라서 플라즈마 덮개 내의 전위분포는 식 (2)를 거리에 대해 적분하여 얻을 수 있으며 얻어진 전위 변화량의 시간에 따른 변화량을 식 (1)과의 관계를 이용하여 펄스 오름 시간동안 전개되는 이온 매트릭스 덮개 크기를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S(t) = \alpha \sqrt{t} \quad 0 < t < t_r \quad (3)$$

여기서 $\alpha = \left(\frac{2\epsilon_0 V_0}{en_0} \right)^{1/2} t_r^{-1/2}$ 이므로 펄스 오름 시간동안 형성되는 이온 매트릭스 덮개의 전개거리는 타겟 근방의 디바이 차폐길이 $\left(\lambda_e = \sqrt{\frac{\epsilon_0 T_e}{2n_0}} \right)$ 와 펄스 오름 시간 비율(pulse rise rate) $\sqrt{\frac{V_0}{t_r}}$ 에 선형적으로 비례하고 이온의 질량에 대한 효과는 무시된다.

덮개 경계에서 이온이 유입되는 펄스 오름 시간동안 이온 Child 전류를 갖는다는 가정에 기초한 Stewart와 Lieberman 모델에[4] 따른 시간에 따른 덮개 경계면의 위치 함수는 다음과 같다.

$$S(t) = \left(\frac{4}{15} \right)^{1/3} \left(\frac{2\epsilon_0 V_0}{en_0} \right)^{1/2} \left(\frac{n_0}{\mu} \right)^{1/2} t_r^{-1/2} t^{5/6} \quad (4)$$

여기서 여기서 타겟 전압은 V_0 , 플라즈마 밀도는 n_0 , 펄스 오름 시간이 t_r , 그리고 이온의 상대적 질량이 $\mu (=m_{ion}/m_H)$ 이다. 이 결과에서 덮개 전개 거리는 펄스 시간의 5/6승에 비례하고 이온의 질량과 관계함을 알 수 있다.

4. 결과 및 토의

본 실험에서는 평면 타겟을 사용하여 펄스의 오름 시간 동안에 형성되는 플라즈마 덮개의 시간적, 공간적 분포를 관찰하였다. Fig. 4는 동일한 플라즈마 발생 조건에서 펄스 오름 시간의 비율을 고정시키고 펄스의 크기를 -20, -30, -40 kV로 변화하며 이에 따른 플라즈마

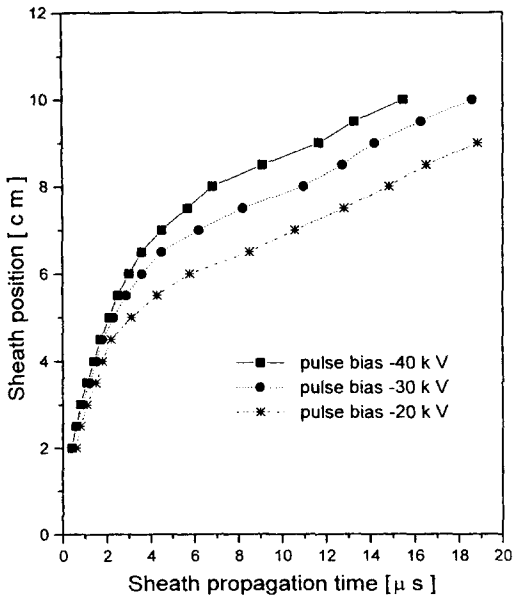


Fig. 4. Sheath propagations with various target bias.

덮개 경계의 변화를 측정한 결과이다. 그림에서와 같이 덮개 거동은 두 개의 영역, 펄스가 완전히 인가되기 전

에 형성되는 덮개의 거동과 펄스가 완전히 인가된 후 펄스의 플래토 시간에 형성되는 덮개의 거동으로 구성되어 있음이 관찰되었다. 펄스의 시간에 따른 오름 비율을 고정하였으므로 -40 kV가 인가되는데 걸리는 시간은 4 μs 가 소요되며 이때 덮개 전개 속도(그림에서 기울기) 변화가 관찰되는 시각도 4 μs 로 서로 일치함을 알 수 있다(Fig. 5-(B)참조). 또한 펄스가 완전하게 인가된 후에 형성되는 덮개의 진행속도(기울기)는 펄스 크기와 상관 없이 서로 같음을 알 수 있다. 펄스 전압 크기를 제외한 모든 조건이 동일한 조건에서 측정되었으므로 발생 플라즈마의 조건도 동일(동일 플라즈마 이온, 플라즈마 온도, 밀도)하므로 펄스 플래토에서의 플라즈마 덮개의 진행속도는 Shamim등의[3] 실험 결과와 같이 이온의 음속도에 비례하여 전개됨을 알 수 있다(Fig. 6참조).

Figs. 5와 6은 펄스 오름 시간의 변화에 따른 시변환 플라즈마 덮개의 특성을 보여준다. 동일한 플라즈마 조건($\sim 5 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ 의 플라즈마 밀도와 4 eV의 전자 온도를 갖는 아르곤 플라즈마)에서 -20 kV 펄스에 대하여 펄스 오름 시간을 2, 4, 6 μs 로 변화하면서 측정하였다. Fig. 5-(A)에서의 사각형, 원, 별은 각각 2, 4, 6 μs 의 펄스 오름 시간에 해당하는 플라즈마 덮개 경계를 나타낸

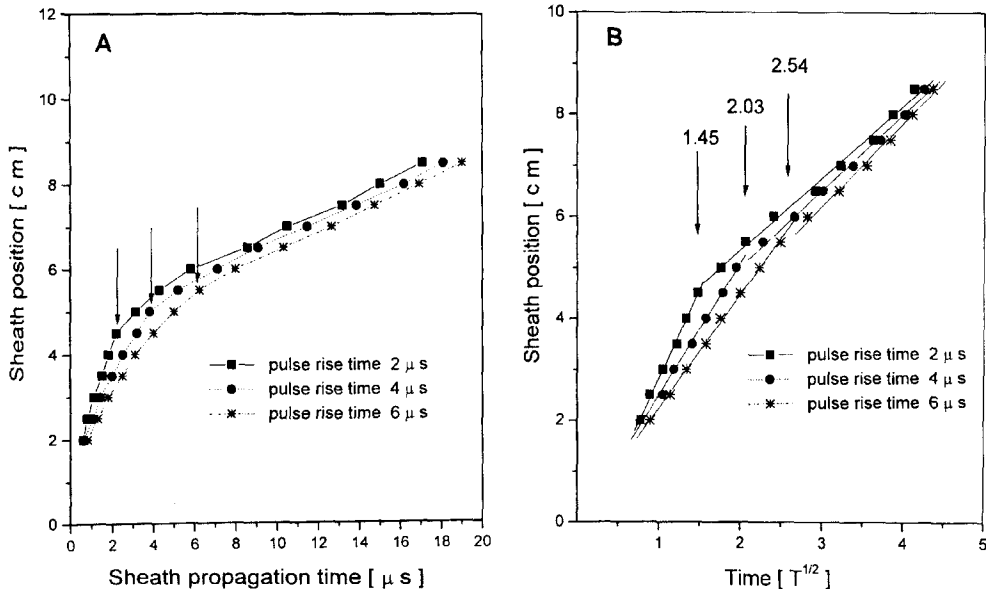


Fig. 5. (A) Sheath propagations with different pulse rise times, 2, 4, and 6 μsec , respectively and the arrows indicate the end of the pulse rise time, 2.10, 4.12, and 6.30, respectively. Data were taken in -20 kV pulse and 200W Ar-plasma, (B) Sheath positions with \sqrt{t} . The arrows indicate the cross points of the two different slopes formed during and after the pulse rise time, 1.45, 2.03, and 2.54 respectively. Those times are correspond to $t = 2.10, 4.12, \text{ and } 6.30$, respectively.

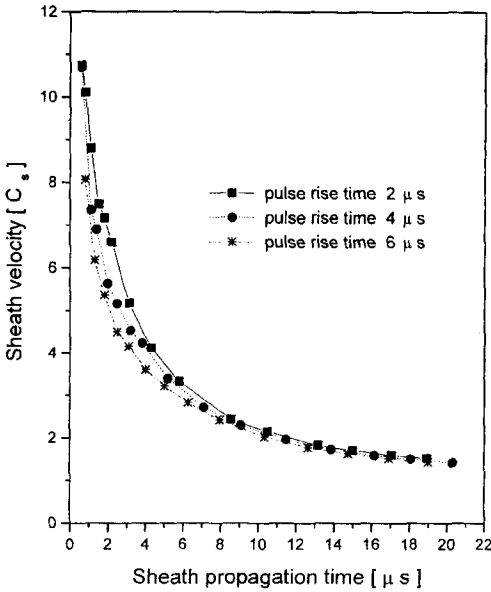


Fig. 6. Sheath velocity with different rise times, 2, 4, and 6 μ sec, respectively. Data were taken in these conditions: -20 kV pulse and 200W Ar-plasma.

다. 여기서의 화살표는 Fig. 5-(B)로부터 얻어진 펄스 오름 시간의 경계지점들이다. Fig. 5-(B)는 \sqrt{t} 에 따른 플라즈마 덩개의 경계를 나타내며 그림에서 보여지듯이 펄스 오름시간에 따라서 형성되는 플라즈마 전개는 시간 변화(\sqrt{t})에 따라 두 개의 기울기를 갖음을 알 수 있으며 두 개의 기울기가 교차하는 교점은, $\sqrt{t} = 1.45, 2.03,$ 및 2.51 로 이는 펄스 시간 $t = 2.10, 4.12,$ 및 6.30 로써 펄스 오름 시간, 2, 4, 및 6 μ sec에 해당함을 알 수 있다. 이 결과는 Fig. 4에서와 같이 시변한 덩개의 특성은 펄스의 오름 시간 내에 형성되는 부분과 오름 시간이 끝나고 플래토 시간에 형성되는 부분으로 구성되어 오름 시간이 끝나는 지점에서 전개되는 덩개의 진행 속도(기울기)가 급격히 변하고 있음을 알 수 있다. Fig. 6에서처럼 덩개 진행은 덩개 오름 시간동안은 이온 음속도에 7~10배 정도로 매우 빠르게 전개되다 펄스가 다 주어진 플래토 시간에는 이온의 음속도 정도로 느리게 진행하고 있다. 본 연구에서는 펄스 오름 시간동안에 형성되는 덩개를 ‘전개되는 이온 매트릭스 덩개(ion matrix sheath expansion)’라 표현하며 플래토 시간에 형성되는 덩개를 ‘동적 플라즈마 덩개의 진행(dynamic sheath propagation)’이라 한다. 이들 특징을 보면 Figs. 5와 6에서와 같이 펄스의 오름 시간동안에 플라즈마 덩개의 전개 속도는 펄스 오름

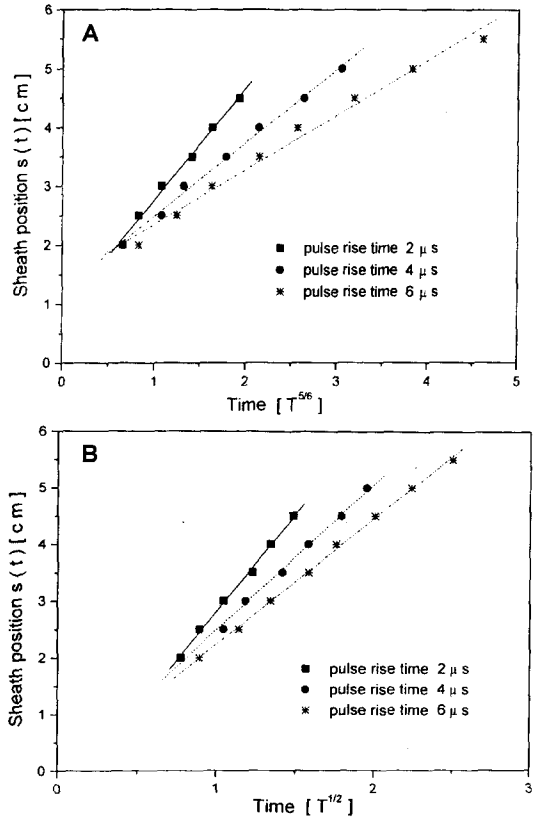


Fig. 7. Comparison of results based on Lieberman's model (A) and ion matrix expansion model (B) for ion matrix sheath formation.

시간이 짧을수록 빠른 속도를 갖으며 빠르게 전개됨을 알 수 있으며 플라즈마 덩개의 진행속도는 펄스 오름 시간이 끝난 후 급하게 감소하며 오름 시간과 무관하게 일정해지고 있음을 알 수 있다. 따라서 전개 이온 매트릭스 덩개는 펄스의 오름 시간 혹은 오름 시간 오프라 관계되며 동적 플라즈마의 전개 속도는 플라즈마의 물리적 조건 즉 플라즈마 온도, 이온 질량(이온의 음속도) 등에 관계하게 된다.

Fig. 7은 펄스가 주어진 초기의 덩개 진행에 대한 두 가지 모델을 이용하여 실험결과를 처리한 결과이다. Fig. 7-(A)는 식 (4)에서와 같이 Stewart와 Lieberman 모델을 이용하여 실험에서 얻어진 덩개 위치를 시간 $t^{5/6}$ 에 대하여 구성한 그림이다. 이 그림에서 보여지듯이 Fig. 7-(A)는 시간이 0일 때 덩개 크기가 0이 아니라는 것을 보여준다. 이것은 타겟에 펄스가 인가되기 전에 이미 어떠한 형태의 덩개가 형성되어 있었다는 것을 의미한다.

이는 펄스가 인가되기 이전에 타겟이 플라즈마와 접촉하고 있으므로 펄스 이전의 타겟은 접지되어 있으므로 타겟 앞에 형성될 수 있는 플라즈마 덩개는 정상상태의 Child-Langmuir 덩개가 가능할 것이나 이 플라즈마 덩개의 예상 크기는 수 디바이 차폐크기로서 본 실험조건에서는 수 mm 크기를 갖게 된다. 따라서 펄스인가 이전에 타겟 앞에 1~2 cm 크기의 플라즈마 덩개가 형성될 이유는 없으므로 이 모델은 펄스 오름 시간동안의 시 변환 플라즈마 덩개의 거동을 설명하기에는 충분하지 못하다고 할 수 있다.

새로운 모델 (3절 참조)에서는 타겟에 걸리는 펄스의 오름 시간 내에 이온은 펄스 오름에 반응하기 힘들므로 펄스 오름 시간 중에는 이온 매트릭스 덩개가 계속 확장 전개된다는 가정을 사용한다. 플라즈마 덩개의 경계는

$$\text{식 (3), 즉 } s(t) = \left(\frac{2\epsilon_0 V_0}{en_0} \right)^{1/2} t^{-1/2} \text{을 이용하여 실험에서}$$

얻은 플라즈마 덩개의 위치를 시간 $t^{1/2}$ 에 대하여 Fig. 7-(B)에 보였다. 그림에서와 같이 시간이 0일 때 덩개의 크기도 0이 됨을 알 수 있다. 따라서 플라즈마 이온주입의 펄스 오름 시간동안에 덩개 내의 이온은 거의 반응하지 않음을 알 수 있으나 실제 식 (3)에서의 기울기 값에 대하여 측정 값에 대한 계산 값의 비가 2.55(2 μ s의 펄스 오름 시간), 2.75(4 μ s의 펄스 오름 시간) 및 2.92(6 μ s의 펄스 오름 시간)로써 모델에서 예측된 값보다 실제 덩개의 전개속도가 빠르게 측정되었다. 이러한 불일치는 펄스 오름 시간 내의 이온의 거동에 관한 영향, 플라즈마 밀도의 비 균일한 공간 분포, 타겟 표면에서 발생하는 이차전자 및 덩개의 기하학적 효과 등에 따른 영향으로 사료되며 이에 대한 추가 연구가 요구된다.

5. 결 론

플라즈마 이온주입에서 관찰된 펄스 오름 시간이 있는 펄스가 인가된 타겟 주위에서의 시변환 덩개의 거동은 펄스 오름 시간동안에 전개되는 이온 매트릭스 덩개

와 완전한 전압이 주어진 후의 진행되는 덩개, 두 부분으로 구성되어 있음을 알 수 있었다. 펄스 오름 시간동안의 덩개 진행을 측정된 결과 덩개 경계에서 이온이 고정되어 있는 것에 기초를 둔 전개되는 이온 매트릭스 덩개 모델과 잘 맞으며 덩개 진행은 플라즈마 밀도 분포에 펄스 오름 비율과 펄스 시간의 루트에 비례하고 이온 질량에 관계없이 진행함을 알 수 있었다. 전개되는 속도는 이온 음속도에 비해 매우 빠르며 펄스 오름 시간 후에 형성되는 진행 덩개는 속도가 늦어지고 이온 음속도에 비례하며 진행함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 1999년 한양대학교 교내 연구비 및 1998년도 한국 학술진흥재단의 공모과제인 신진연구과제 1998-003-D00100의 연구비에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] J. R. Conrad, J. L. Radtke, R. A. Dodd and F. J. worzala, *J. Appl. phys.* **62**(11), 4591 (1987).
- [2] J. R. Conrad, R. A. Dodd and S. Han, *J. Vac. Sci. Technol.* **A8**(4), 3146 (1990).
- [3] M. Shamim, J. T. Sheuer and J. R. Conrad, *J. Appl. Phys.* **69**(5), 2904 (1991).
- [4] R. A. Stewart and M. A. Lieberman, *J. Appl. Phys.* **70**(1), 3481 (1991).
- [5] S.-H. Han, H.-D. Kim, Y.-H. Lee, J.-H. Lee and S.-G. Kim, *Surface and Coating Technology* **82**, 270 (1996).
- [6] S.-H. Han, Y.-H. Lee, H.-D. Kim, G.-H. Kim, J.-H. Lee, J.-H. Yoon and G.-W. Kim, *Surface and Coating Technology* **93**, 261 (1997).
- [7] 김건우, "플라즈마 이온 주입 기술에서 2차원 평면 주위에 형성되는 시변환 쉬스 측정", 석사학위 논문, 한양대학교 (1997).
- [8] 김영권, 김영삼, 조대근, 최은하, 조광섭, 한국진공학회지, **7**(4), 381 (1998).