

플라즈마 이온주입에서 쉬스 동역학에 관한 연구

김광훈*, 조주현, 최영욱, 이홍식, 임근희, S.Nikiforov
한국전기연구원 전기물리연구팀

Study of Sheath Dynamics in Plasma Source Ion Implantation

G.H. Kim*, C.H. Cho, Y.W. Choi, H.S. Lee, G.H. Rim, S. Nikiforov
Applied Electrophysics Team, KERI

Abstract - Plasma source ion implantation (PSII) is a non-line-of-sight technique for surface modification of materials which is effective for non-planar targets. A apparatus of 30kV PSII is established and plasma characteristics are diagnosed by using a Langmuir probe. A spherical target is immersed in argon plasma and biased negatively by a series of high voltage pulses. Sheath evolution is measured by using a Langmuir probe and compared with the result of computer simulations.

1. 서 론

물질의 표면을 개질하여 내구성, 내마모성, 및 내부식성 등의 표면 특성을 향상시키는 기술에 대한 산업적 수요는 꾸준히 증가되고 있다. 표면열처리, 코팅 등의 여러 가지 재래식 표면개질 기술이 이용되어 왔으나 표면 특성의 향상은 한계에 부딪쳐서 근래에 들어서 이온주입 기술(ion implantation technology)에 대한 연구와 개발이 활발하게 진행되고 있다. 이온주입기술은 반도체 재료에 불순물을 도핑하기 위하여 개발된 것으로 이온을 수십~수백 keV로 가속시켜 재료의 표면에 주입하여 소재의 표층만을 개질하는 방법이다. 표층의 조성, 구조, 화학 결합 등의 미시적 성질을 변화시켜 전기적, 광학적, 기계적 특성 등의 거시적 성질을 향상시키는 데 이온주입법은 효과적인 방법이라는 것이 알려져 왔다. 그러나 이온주입법은 우수한 연구결과에도 불구하고 금속의 표면개질에 널리 사용되고 있지 않은 상태이다. 그 이유는 기존의 이온주입법이 이온화실 내의 플라즈마로부터 이온을 외부로 인출하여 빔의 형태로 만들어 시료에 조사하는 이온빔주입법(ion beam implantation technology)이기 때문이다. 이온빔 주입장비가 본래 반도체 재료의 불순물 도핑용으로 개발되어서 장비의 가격이 매우 비싸기 때문에 재료의 표면처리용으로는 제약을 받는다. 이온빔 주입 장치는 첨가하고자 하는 원소를 이온화하는 이온원, 이온을 끌어내어 가속하는 가속장치, 필요한 이온만을 선택하기 위한 질량분석 장치, 시료의 넓은 면적에 걸쳐서 균일하게 입자를 주입하기 위한 빔 주사장치 등 설비가 복잡하다. 또한 이온빔 주입장비는 투시기법(line-of-sight)으로 표면을 개질하고자 하는 피사체를 삼차원적으로 회전을 시켜주어야 하는 단점이 있고 이온을 균질하게 주입하는 데 한계가 있다.

플라즈마 이온 주입기술(plasma source ion implantation: PSII)은 기존의 이온빔 주입기술이 갖고 있는 여러 가지 문제점들을 극복할 수 있는 원론적으로 새로운 개념의 독창적인 이온 주입기술로서 1987년 미국 Wisconsin 대학의 J. R. Conrad 교수에 의하여 처음으로 제안되었다 [1]. 플라즈마 이온주입법은 비투시기법(non-line-of-sight technique)의 표면개질 방

법으로 평탄하지 않는 형태의 시료에 이온을 주입하는 방법으로 아주 우수하다. 이온빔 주입과 달리 플라즈마 이온주입에서는 시료가 플라즈마 상태의 이온원 가운데에 놓이고 여기에 강한 역전압이 인가되면, 이온들이 플라즈마 쉬스(plasma sheath)를 가로질러 시료의 표면과 수직인 방향으로 가속되어 주입된다. 가속되는 이온들이 시료의 모든 면에 동시에 수직하게 주입되므로 이온빔주입에서와 같은 빔 주사장치, 시료 조종장치가 필요 없어서 시료의 크기와 무게가 크게 문제되지 않는다. 그리고 이온 주입량을 균질하게 하기 위한 마스크도 필요 없는 비투시기법이므로 설비장치가 매우 간단하고 시료제작에 드는 경비가 아주 저렴하다.

플라즈마 이온주입은 시료를 둘러싸고 있는 플라즈마로부터 이온을 뽑아내 시료에 주입하기 위하여 수십~수백 kV에 이르는 펄스 형태의 역전압을 걸어주어야 하는데 이러한 전원장치를 개발하는 것이 플라즈마 주입기술의 핵심 기술이다. 시료에 주입되는 이온의 양은 플라즈마 쉬스의 확장과 관계가 있는데 플라즈마 밀도, 펄스 폭, 인가되는 역전압의 세기 등에 의존한다. 고전압이 가해지는 동안 시료를 둘러싸고 있는 쉬스가 팽창하여 이웃하는 시료의 쉬스와 겹치거나 진공원벽(vacuum chamber wall)에 닿아서 시료에 주입되는 이온이 균질하지 않을 수 있으므로 플라즈마 이온주입 기술에 있어서 쉬스의 변화를 연구하는 것이 아주 중요하다. 본 연구에서는 플라즈마 이온주입 장치를 설계, 제작하고 그 특성을 조사하였다. 그리고 구형의 시료가 Ar 플라즈마에 놓여있을 때 고전압이 인가되는 동안에 발생하는 플라즈마 쉬스의 변화를 Langmuir probe로 측정하고 컴퓨터 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

2. 플라즈마 이온주입 장치

플라즈마 이온주입 장치는 플라즈마 진공원, 진공장치, 고전압 전원장치, 플라즈마 진단장치, 냉각장치 등으로 구성되어 있으며 개략도는 그림 1과 같다. 플라즈마에 잠긴 시료에 고전압 펄스가 가해지면 이온들이 모

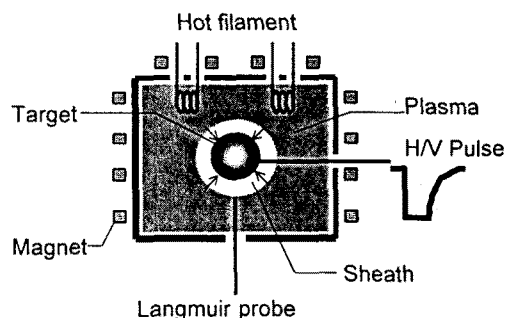


그림 1. 플라즈마 이온주입 장치의 개략도

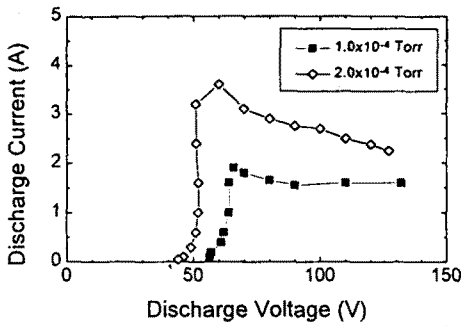


그림 2. Ar 압력에 따른 방전 전류-전압 특성

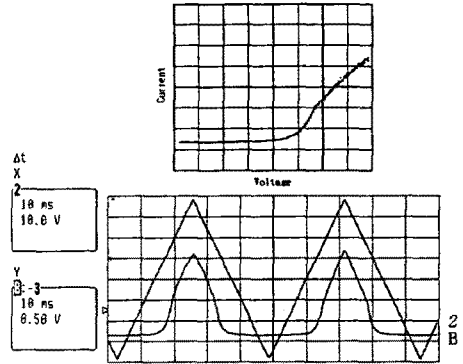


그림 3. 탐니파의 전압이 인가되었을 때 측정된 Langmuir probe의 전류와 I-V 특성

든 방향에서 동시에 시료 쪽으로 가속되어 주입된다.

PSII 진공원은 직경 300mm, 높이 260mm의 원통형으로 스테인레스로 만들어졌다. 플라즈마는 진공원 윗 덮개에 부착된 4개의 텅스텐 필라멘트에서 가열되어 나오는 열전자와의 충돌에 의하여 생성되고 영구자석을 이용하여 구성된 magnetic cusp mirror에 의하여 진공원 안에 구속되었다. 진공원에는 플라즈마 진단을 위한 Langmuir probe, 시료에 가해지는 고전압 feedthrough, thin film 증착을 위한 feedthrough 등을 위한 창이 여러 개 설치되었다. 로터리 진공펌프와 오일확산펌프를 이용하여 진공원의 기저 기압을 10^{-7} Torr 정도까지 내렸고 이온주입 실험을 할 때는 기압이 $1 \sim 4 \times 10^{-4}$ Torr 정도였다. 플라즈마 발생에 사용되는 기체로는 N_2 , Ar, CH_4 , BF_3 , H_2 등이 사용될 수 있는데 기체의 흐르는 양을 조절하기 위하여 mass flow controller(MFC)를 사용하였다.

고전압 펄스 전원장치는 PSII에서 가장 중요한 장치이다. IGBT에 의하여 제어되는 30kV급의 진공관 스위치(GMI30, Russia)를 이용하여 구형파의 높은 역전압 펄스를 생성시켰다. 펄스폭은 $2 \sim 20 \mu sec$ 이고 펄스 반복율은 $20 \sim 2000 Hz$ 이다. 고전압 feedthrough는 움직일 수 있으며 물로 냉각되는 시료대가 연결되어 있다. 시료에 가해지는 고전압은 voltage divider로 측정하였고 전류는 Rogowski coil을 사용하였다. 이온혼합(ion mixing)에 의한 박막을 만들기 위하여 sputtering 전원장치가 추가로 설치되었다.

3. 플라즈마 진단 및 쉬스 동역학

플라즈마 특성에 앞서 방전특성을 조사하였다. Ar 기체의 압력이 각각 1.0×10^{-4} Torr, 2.0×10^{-4} Torr일 때 방전 전류-전압 특성을 나타낸 것이 그림 2이다. 전압이 50V 정도일 때 전류가 급격히 증가한 후에 안정된 형태를 보여준다. 플라즈마 변수들(공간전위 V_s , 부동전위 V_f , 전자온도 T_e , 전자밀도 $n_e = n_0$)의 공간적, 시간적 변화를 측정하기 위하여 직경 0.5mm, 길이 10mm의 원통형 Langmuir probe를 사용하였는데 높이 조절이 가능하다. 그림 3은 탐니파의 전압(channel 2)을 probe에 인가하였을 때 측정된 probe 전류(channel B)와 전류-전압의 Langmuir probe 특성을 나타내는 오실로그래프의 한 예이다. Probe를 플라즈마 내에 삽입하게 되면 열확산에 의한 전자가 이온전류가 쉬스를 포함한 probe의 표면으로 유입되고, 가해지는 전압에 따라 플라즈마와 probe 사이에 전위장벽이 형성되면서 주로 전자 전류의 감소로 인한 천이영역과 포화영역으로 구분되는 probe의 전류-전압 특성곡선을 얻게 된다.

Probe 전압이 부동전위와 같으면 안정된 상태에서는

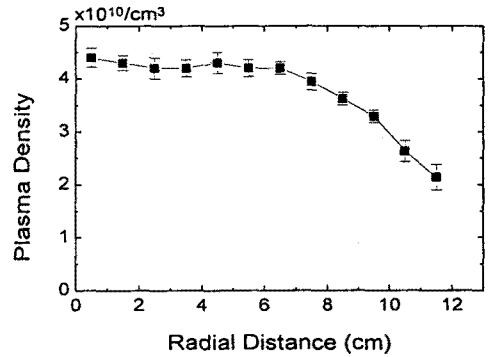


그림 4. 플라즈마 밀도의 공간적 분포

이온 유속(ion flux)이 전자 유속(electron flux)과 같고 probe 전류는 제로가 된다 [2].

$$n_e u_{is} = \frac{1}{4} n_e u_e e^{-V_f/T_e} \quad (1)$$

여기서 $u_{is} = \sqrt{kT_e/M}$ 는 Bohm 이온 음속이고, $u_e = \sqrt{8kT_e/\pi m}$ 는 이온 평균 속도이다. 따라서 전자 온도는 다음과 같다.

$$\frac{k_B T_e}{e} = \frac{2V_f}{\ln(2\pi \frac{m}{M})} \quad (2)$$

여기서 k_B 는 Boltzmann 상수이고, m 과 M 은 각각 전자와 이온의 질량이다. 아르곤 기체의 압력이 2.0×10^{-4} Torr, 방전 전류가 4A일 때 공간 전위는 30V, 부동전위는 -23V로 측정되었으므로 전자 온도는 $T_e \approx 5eV$ 임을 알 수 있다.

안정상태의 방전에서 presheath는 이온들을 쉬스 테두리에서 Bohm 속도, $u_{is} = \sqrt{kT_e/M}$ 가 되도록 가속시킨다. 쉬스 영역에서 전위는 점진적으로 감소한다. presheath에서 이온들이 가속되면 쉬스 테두리에서 이

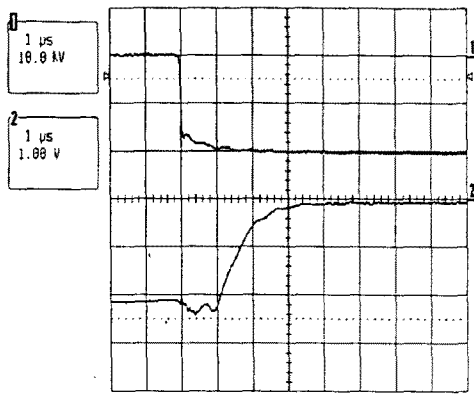


그림 5. 시료에 인가되는 고전압(channel 1)과 Langmuir probe 전류(channel 2)

은 밀도는 방해받지 않는 플라즈마(undisturbed plasma) 밀도보다 0.6배 작다. 전류는 다음과 같으므로,

$$I_{is} = 0.6Aen_0u_{is}. \quad (3)$$

플라즈마 밀도는 다음과 같다 (2).

$$n_0 = \frac{I_{is}}{0.6AVeT_e/M} \quad (4)$$

여기서 A 는 쉬스의 면적이다. 측정된 전류는 $I_{is} = 1mA$ 로 전자 밀도는 $n_e = 4 \times 10^{10}/cm^3$ 이다. 초기의 쉬스 두께는 약 0.8cm 정도이다. 그리고 그림 4는 공간적 위치에 따른 플라즈마 밀도의 분포를 나타낸 것이다. 중심 부근에서는 밀도분포가 고르다는 것을 알 수 있다.

시간적, 공간적 쉬스의 변화는 Langmuir probe의 위치를 변화시켜가면서 고전압 펄스와 probe 전류를 동시에 오실로스코프로 보면서 측정하였다. 시료에 전압이 인가되어 전자가 밀려가면서 쉬스 테두리가 확장되는 데 probe의 위치까지 확장되면 probe에 흐르는 전자 전류는 그림 5에서 보는 바와 같이 급격히 감소한다. 역전압의 시작시각과 쉬스의 도착시각의 차이로부터 쉬스가 probe의 위치까지 확장되는 데 걸리는 시간을 알 수 있다. Probe의 위치를 달리하면서 쉬스 확장 시간을 측정하면 쉬스 테두리의 위치를 시간의 함수로 얻을 수 있다. Probe에서 측정된 전자전류가 고전압이 인가될 때 조금 증가하는 것이 관찰되는 데 이것은 쉬스로부터 전자가 밀려나거나 시료로부터 방출되는 이차전자를 때문에 일시적으로 플라즈마 밀도가 증가하기 때문이다 [3]. 본 실험에서는 지름 52mm인 구형의 스테인레스 시료에 20kV의 역전압이 인가될 때 probe의 위치를 시료로부터 거리가 각각 2, 3, 4cm로 하고 플라즈마 쉬스의 확장을 측정하였다. 플라즈마 밀도는 $4 \times 10^{10}/cm^3$ 이고 전자온도는 약 5eV이었다. 그리고 컴퓨터 시뮬레이션은 공개 소프트웨어인 Berkeley대학의 코드를 이용하였다 [4]. 실험 및 계산결과는 그림 6에 나타낸 것과 같이 잘 일치하였다. 플라즈마 쉬스가 역전압이 인가되는 초기에 빠른 속도로 팽창되고 그 속도가 점점 줄어든다. 5 μsec 정도만에 쉬스의 확장은 포화되고 그 거리는 약 4cm정도이다.

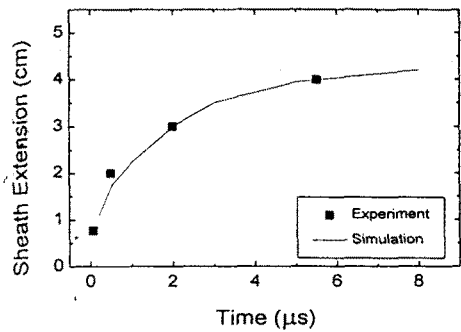


그림 6. 20kV의 역전압이 구형의 시료에 인가될 때 시간에 따른 플라즈마 쉬스의 확장

4. 결 론

본 연구에서 우리는 비투사기법(non-line-of-sight technique)으로 시료의 표면특성을 향상시킬 수 있는 플라즈마 이온주입 장치를 설계, 제작하였다. Langmuir probe를 이용하여 플라즈마 특성을 조사한 결과 전자온도는 5eV, 플라즈마 밀도는 $4 \times 10^{10}/cm^3$ 정도였다. 플라즈마 이온주입 기술에서는 시료에 주입되는 이온의 양과 그 균질성을 알기 위하여 고전압 펄스가 가해지는 동안에 일어나는 쉬스의 확장을 아는 것이 중요하기 때문에 우리는 구형의 스테인레스 시료를 이용하여 쉬스의 확장을 실험적으로 조사하였다. 플라즈마 밀도가 $4 \times 10^{10}/cm^3$ 정도일 때 20kV의 역전압이 시료에 인가되면 쉬스는 수 μsec 만에 수 cm 정도까지 확장되었다. 이 결과는 컴퓨터 시뮬레이션한 결과와 잘 일치하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 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).
- [2] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, *Principles of plasma discharges and materials processing* (John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994).
- [3] M. Shamin, J. T. Scheuer, and J. R. Conrad, "Measurements of spatial and temporal sheath evolution for spherical and cylindrical geometries in plasma source ion implantation", J. Appl. Phys. 69, 2904 (1991).
- [4] C. K. Birdsall, V. P. Gopinath, and J. P. Verboncoeur, *Plasma computer experiments laboratory* (University of California, Berkeley, 1996).