

## 플라즈마 쉬스 (Sheath) 를 이용한 이온 주입법

조 무 현

포항공과대학 물리학과  
산업과학기술연구소 물리연구소

### Ion Implantation Using Plasma Sheath

Moo-Hyun Cho

Department of Physics, POSTECH

Physics, RIST

#### Abstract

Ion implantation is a well established superior surface modification technique for the improvement of wear resistance, hardness, corrosion resistance, biocompatibility, surface friction, as well as for the modification of surface electric conductance. Conventional ion implantation is a line-of-sight process which uses the ion beam accelerator techniques. Plasma sheath ion implantation (PSII), as a new technique, is described in this paper. In PSII high voltage pulse is applied to a target material placed directly in a plasma, forming a thick ion-matrix sheath around the target. Ions accelerate through the sheath drop and bombard the target from all sides simultaneously regardless of the target shape. This paper describes the principle of PSII, which has non-line-of-sight characteristics, as well as the experimental apparatus.

#### 1. 서 론

1954년경 처음으로 반도체의 도우핑을 위해 제안된 이온 주입법 (ion implantation)은 1970년대 중반부터 반도체의 생산공정에 직접 사용하게 되었으며<sup>1)</sup>, 그간의 수많은 연구 (ion implantation metallurgy)의 결과로 반도체 산업 뿐만 아니라 금속표면의 특성을 개선시킬 수 있는 탁월한 방법으로 인식되고 있다.

예를 들면, 재료에 따라 적절한 이온을 주입함으로써 표면강도, 내부식성, 내마모성의 증대 및 마찰계수의 감소 그리고 생체적응성의 증대<sup>2)</sup> 등의 특성을 재료 전체를 특수합금으로 사용하지 않고도 얻을 수 있게 되었다. 이온 주입기술은 전기준위차를 이용하여 이온을 가속시켜 고체표면에 투입시키게 되는데 이온의

가속전압 (10~500KV)을 조절함으로써 주입되는 깊이 (~0.1 $\mu$ m)를 조절할 수 있고 주입되는 이온의 종류를 측정함으로써 그 조성비(20~50atom%)도 정확히 조절할 수가 있다. 이온의 주입과정에서 상당한 밀도의 빈자리 (vacancy)와 격자간원자 (interstitial atom)가 충돌에 의해 생성되며 이들이 표면의 내마모성 증대에 기여하는 것으로 이해되고 있다<sup>2)</sup>. 특히 이 공정은 열 확산법에 의한 주입법과 달리 열역학적 제약이나 용해도의 제약을 받지않게 됨으로써, 표면 근처에서 기타의 방법으로는 만들 수 없는 새로운 조성의 재료를 생성할 수 있는 특징이 있다.

이러한 이온 주입법은 현재까지 상용화된 장치로서 아이온을 생성·추출한 후 빔의 형태로 가속하여 표적 재료에 주사하는 형태의 장치를 사용하여 왔는데 (line-

of-sight공정) 표적재료가 3차원 구조를 가질 경우 이러한 이온 주입공정은 표면전체의 이온의 균일 주입을 위해 표적재료의 3차원 구동장치가 필요하고 곡면이 포함되어 있을 경우 Sputtering 현상을 방지하기 위한 마스크설비가 필요하다. 특히 이러한 3차원 구조의 표적재료가 크고 무거운 물질일 경우 여타의 표면처리 공정에 비해 엄청난 처리비용이 드는 비경제적인 여건을 초래하여 이온 주입법을 적용하는데 커다란 제한요소가 되고 있다.

본 논문은 현재 상용되고 있는 이온 주입장치의 line-of-sight 제약조건에 구애를 받지않은 비교적 간단한 장치로서 최근 개발된 플라즈마 쉬스(Sheath)를 이용한 이온 주입법(PSII)<sup>3)</sup>의 원리 및 장치를 소개하고자 한다.

## 2. 플라즈마 Sheath를 이용한 이온 주입법(PSII)의 개념

그림 1은 현재 상용화된 line-of-sight 공정을 이용한 이온주입기 장치의 구조를 보인 것으로서 중요한 부분은 다음과 같이 구분할 수 있다; 이온을 추출할 플라즈마 발생장치, 이온의 종류 및 에너지를 선별하는 2극자석, 이온빔 가속장치, 빔의 모양을 조절하기 위한 4극자석, 표적에 균일조사를 유도하는 조사장치, 표적

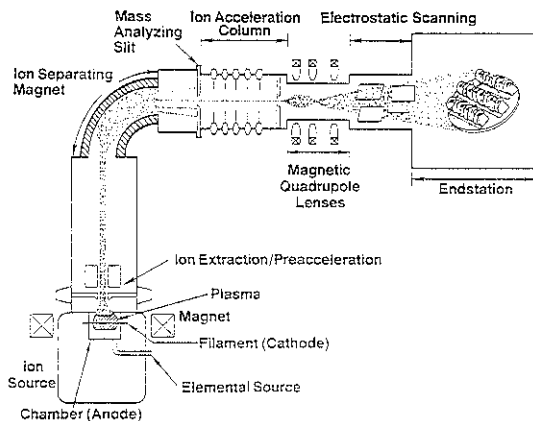
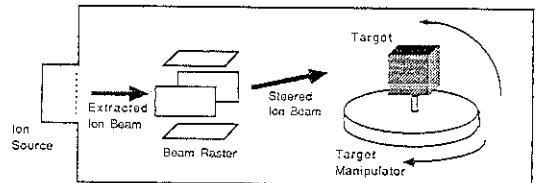


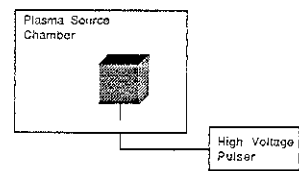
그림 1. 빔 가속형 이온 주입장치도. 중요부분; (1)가스방전을 통한 양이온 생성장치, (2)가속 및 질량분석장치, (3) 이온 빔 셰이핑장치, (4) 표적구동장치

구동장치 등으로 구성되어 있다. 이들 구성품 중 약간의 불순물에 영향을 받지않는 공정의 경우(주로 반도체 응용 이외의 공정)는 2극 자석 장치를 제거하여 플라즈마원으로부터 표적까지 직선형태로 장치를 만들 수 있는데 이 경우를 PSII의 이온주입법과 비교하여 그림 2에 나타내었다. PSII 법에서는 그림 2-A에서 보인 바와 같이 표적이 직접 플라즈마 용기 내부에 위치해 있고 그 표적에 플라즈마 용기 벽에 대해서 마이너스인 고전압 펄스가 인가되도록(high voltage pulser) 되어 있다. 플라즈마 내의 이온들은 표적에 걸린 마이너스 전압에 의해 발생한 쉬스를 가로질러 표적의 면에 수직인 방향으로 가속되어 주입되게 된다. 즉, 표적에 인가된 마이너스 펄스에 의해 형성된 플라즈마 쉬스는 인가된 전압이 플라즈마 내부로 확장되는 한계 영역으로서 플라즈마의 특성 파라메타에 따라 달라지게 되는데, 인가된 전압의 모든 전압강하가 이 쉬스 영역에서 일어난다. 표적 주변의 플라즈마는 그 고유한 성질에 의해 균일한 전이 영역을 외부의 조절의 필요성이 없이 표적면에 형성시킨다. 따라서 이온은 표적의 크기나 형상에 관계없이 표면에 수직인 전기력선을 따라 전체 표면이 동시에 균일하게 주입이 되게 된다



## Conventional Beamline Implantation

- Line of sight process
- Beam rastering and target manipulation are required to achieve uniform implantation



## Plasma Source Ion Implantation

- Plasma sheath surrounds target
- Ions bombard all surfaces of target without beam rastering or target manipulation

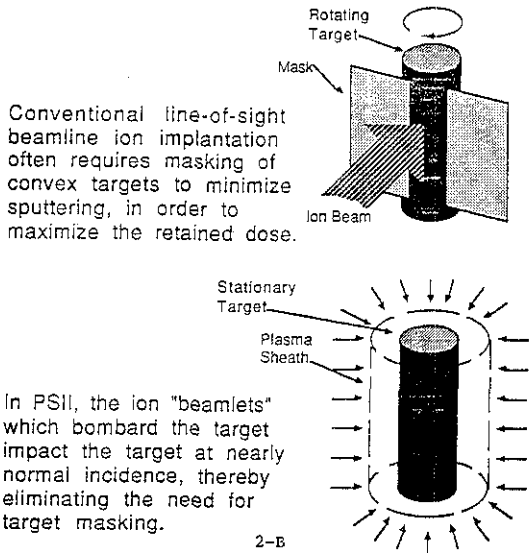


그림 2. 빔 가속형 이온주입 장치와 PSII 장치의 개념비교 [참고문헌 3] (A) 장치의 비교, (B) 표적에서의 원리 및 현상

(Non-line-of-sight process). 플라즈마 쉬스에 관한 이론은 다음 절에 상세히 언급하였다. 뿐만 아니라 기존의 방법에서 곡면의 표적에 대해 거의 수직입사(약 $20^\circ$  이내)의 이온 빔만을 허용하는 마스크장치로 인해(그림 2-B 참조) 빔의 일부가 항상 손실되는 문제도 발생하지 않게 된다.

이를 요약하면 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 PSII에서는 빔의 가속장치, 조사장치, 표적 구동장치가 필요없게 되므로 기존의 빔 가속장치를 이용한 이온주입 장치보다 훨씬 간단하고 따라서 경제적이며 장치의 운전이 용이한 특징을 갖고 있다. 뿐만 아니라 PSII에서는 이온빔의 광학적 특성이나 Child-Langmuir의 space charge limit<sup>4,5)</sup>에 의한 전류제한을 받지 않으므로 훨씬 높은 이온전류(ion flux)를 표적에 공급하는 장점도 있다.

이상 간단히 설명한 PSII 법은 현재 광범위하게 활용하고 있는 이온 플레이팅과 다소 유사한 점이 있으나 고전압 펄스가 인가된다는 점이 큰 차이점이며 특히 후자의 경우는 박막을 코팅하는 공정이므로 박막의

균형이나 벗겨짐이 생기는 약점이 있어 이온 주입에 의한 표면특성개선 및 이온 주입후에도 재료의 치수 변화가 없다는 장점에서 볼때 이온 주입법의 우월성을 쉽게 이해할 수가 있다. 이온질화 처리법도 또 다른 유사공정이나 열확산법을 사용하므로 처리 시간이 대단히 길고 용해도의 한계가 있음이 약점이라고 할 수 있다.

PSII 법에서 펄스를 사용해야하는 이유는 다음의 몇가지로 요약할 수 있다. 첫째 짧은 펄스( $\sim 10\mu\text{sec}$ )를 사용함으로써 표적표면에서 발생할 수 있는 아크에 의한 손상을 방지할 수 있고, 둘째 짧은 펄스에 의해 표면의 위치에 따른 균일성 및 주입 깊이의 균일성을 유지할 수 있고(플라즈마 쉬스에 관련된 것으로 다음 절에서 설명), 셋째 고전압 펄스주기 사이동안 저에너지 이온 피폭에 의한 방전세척의 효과로 불순물 오염을 최소화할 수 있으며, 끝으로 표적물이 부도체인 경우에도 펄스 전압의 Capacitive Coupling 효과로 이온의 가속 및 주입이 도체인 금속의 경우와 마찬가지로 유도된다.

### 3. PSII의 플라즈마 Sheath 이론

그림 2에서 보인 바와 같이 표적재료를 플라즈마의 중심부에 직접 위치하여 이온 주입을 유도하려면 앞서 설명한 바와 같이 마이너스의 고전압펄스가 표적재료에 인가되어야 하고, 이때 표적재료의 표면과 플라즈마 사이에 형성되는 일종의 완충지대(플라즈마 Sheath라고 불림)가 인가된 펄스의 전압에 따라 동적특성을 갖게 된다<sup>6)</sup>. 따라서 플라즈마 쉬스의 동적특성을 이해함으로써 플라즈마 내부의 이온이 표적으로 가속될 때의 에너지분포와 그 양(ion flux)을 알 수 있으며 이에 따라 실험장치의 설계 및 운전에 필요한 기본 파라메타를 추정할 수 있다. 즉, 공정에 관련된 중요한 파라메타로서 이온의 에너지분포 및 펄스당 이온의 유입량을 추정하기 위해서는 동적 특성을 갖는 플라즈마 쉬스의 두께 및 전압분포의 상태를 알아야 한다.

본 절에서는 쉬스의 동적 특성과 관련하여 지금까지 알려진 기본적인 해석이론의 PSII 법의 이론적 모델로서 소개하고자 한다.

플라즈마 쉬스는 그림 3에서 보인 바와 같이 플라

즈마 내부에 있는 전극이나 임의의 물체 혹은 플라즈마 용기의 내벽 등 플라즈마와 직접 접촉하는 물체의 표면에 형성되는 완충적 전이 영역으로서<sup>4)</sup> 플라즈마가 갖는 고유의 집합적 특성 (collective phenomena) 에 기인한다. 만일 물체가 전기적으로 고립된 상태 (floating condition) 에 놓여 있으면 플라즈마의 전자가 이온에 비해 운동성이 매우 높으므로 (온도 및 질량차에 의해서) 단위 시간당 물체의 표면에 충돌하는 전자의 수가 이온에 비해 상대적으로 많다. 고립된 물체는 전류를 흘릴 수 없으므로 표면의 전위는 플라즈마의 전위보다 낮게되고 따라서 전자의 일부를 밀어내어 표면에 충돌하는 이온과 전자의 수가 같아지게 된다.

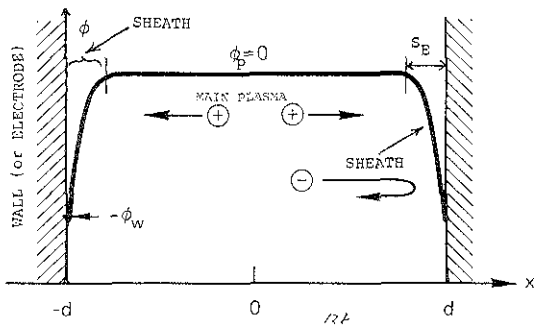


그림 3. 평행상태의 플라즈마 쉬스 전압분포

(즉, 순전류=0) 이 때 주플라즈마로부터 쉬스의 경계선을 통과하여 표면에 충돌하는 이온의 유입량은 Bohm 의 쉬스이론에 의하면,

$$J_{Bohm} = en_e \sqrt{\frac{k T_e}{M_i}} \quad \dots\dots(1)$$

단,  $J_{Bohm}$  : 전류밀도(A/m<sup>2</sup>),  $n_e$  : 플라즈마 밀도 (#/m<sup>3</sup>)

$e$  : 전자의 전하량(Coul),  $T_e$  : 전자의 온도(K)  
 $M_i$  : 이온의 질량(kg)  $k = 1.38 \times 10^{-23}$  J/K (Boltzmann 상수)

이다.

만일 물체(전극)가 직류전원에 의한 바이어스 전압인가로 플라즈마의 준위와 같은 전압조건이면 표면에서의 쉬스 형성은 일어나지 않고 식(1)에서의 이온전류 대신 전자의 충돌에 의한 전류(전자포화 전류)

만이 전원장치를 따라 흐르게 된다. 즉, 플라즈마는 내부의 물체의 존재를 전기적으로 의식하지 않는 상태로 되다. 이 상태에서 전극에 갑자기 부(-)의 큰 전압 ( $e\phi_w/T_e \gg 1$ ) 을 인가하면 그 전압변화에 따라 전극에서 쉬스가 형성되고 그 쉬스의 반응은 세가지의 특성반응으로 나누어 생각할 수 있다.

전극에서 부(-)의 전압이 형성됨에 따라, 운동성이 큰 전자가 전극 주위로부터 먼저 반발되어 밀려나게 된다. 이러한 전자의 반발은 거의 플라즈마의 전자 진동주기 동안에 일어나고 (예 ;  $10^{16}$ /cm<sup>3</sup>의 전자밀도에서 약 10nsec) 이 때 전극 주위의 이온들은 미처 반응을 못하고 균일한 공간전하로서 분포해 있게 된다. 이때의 전극주변의 이온의 공간전하(전자가 빠져버린 상태)에 의한 전압분포는 이온-격자 (ion matrix) 모델로 묘사될 수 있다<sup>6)</sup>. 평면 전극의 경우 위치에 따른 전압분포는<sup>7)</sup>

$$\tilde{\phi}_p(x) = -\tilde{\phi}_w + \tilde{S}_i(x-d) + \frac{1}{2}(d^2 - x^2) \dots\dots(2)$$

이다. 이때  $\phi_p(x)$ 는 위치 x에서의 공간전압,  $-\phi_w$ 는 전극에 인가된 전압,  $\tilde{S}_i$ 는 이온격자 쉬스의 두께, d는 전극의 위치이다. 변수위의 ~(tilde)는 표준화된 무차원 변수로 위치는 전자의 Debye 길이 ( $\lambda_{De} \sim 740\sqrt{T_e}$  (eV)/n<sub>e</sub>(cm<sup>-3</sup>)cm)에 대해, 전압은 전자의 온도 ( $T_e/e$ )로 나눈 값이다. 식(2)에서 이온-격자 모델에 따른 쉬스의 두께 S를 구하면, 즉, x=S, d=0,  $\phi_p(S)=0$ 일때,

$$\tilde{S}_i = \sqrt{2\tilde{\phi}_w} \quad \dots\dots(3)$$

이다.

다음으로 낮은 속도로 움직이는 이온들이 플라즈마 이온 진동주기 (예 ;  $10^8$  #/cm<sup>3</sup>의 밀도에서 약 1μsec) 의 시간으로 전극을 향해 이온-격자 쉬스를 가로질러 가속되게 된다. 계속적인 이온의 가속에 따라 쉬스의 가장자리는 점점 플라즈마 내부로 전파되어 (그림 4 참조) 천천히 정상상태의 쉬스를 형성하면서 동적 움직임이 멈추게 된다<sup>8)</sup>. 따라서 표적으로 유입되는 이온의 양은 이온-격자 쉬스 내부의 이온의 양과 고전압 펄스 주기동안의 쉬스확장에 따라 유입되는 이온의 양을 합해서 이론적으로 추정할 수 있다.

그림 4가 펄스에 의한 동적 움직임을 개념적으로

표시한 것이다. 정상상태 (steady state) 에서는 식(1)에서의 Bohm 쉬스전류와 Child-Langmuir 법칙의 공간전하에 의해 제약된 전류<sup>4,5)</sup>, 즉

$$J_{CL} = \frac{4}{9} \sqrt{\frac{2e}{M_i}} \epsilon_0 \frac{\phi_w^{3/2}}{S_E^2} \quad \dots\dots(4)$$

(단,  $S_E$  : 평형상태의 쉬스두께,

$\epsilon_0$  ; 진공에서의 유전율)

가 거의 같은 값이 되므로 (즉,  $J_{Bohm} \cong J_{CL}$ ) 정상 상태의 쉬스두께를 구하면

$$\bar{S}_E \cong \phi_w^{3/4} \quad \dots\dots(5)$$

이다. 동적 쉬스의 특성의 정확한 해석적 해답은 구할 수 없으나 이상의 결과로 급작스런 전압변화 (즉, 펄스인가)에 의한 쉬스의 두께 변화는 식(3)에서 시작하여 식(5)로 평형이 됨을 알 수 있다.<sup>6)</sup>

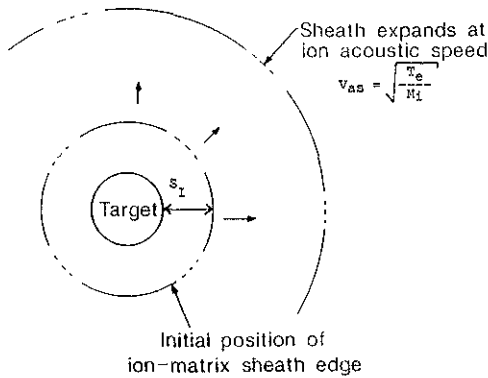


그림 4. 부(-) 고전압 펄스 인가에 의한 과도기 쉬스의 확장

이상 살펴본 쉬스의 두께는 식에서 볼 수 있는 바와 같이 플라즈마의 밀도, 전자 온도 및 표적에 인가된 고전압 등에 의해서 결정된다. 한가지 추가로 지적되어야 할 사항은 만일 표적재료의 형상이 평면구조로 가정 (표면의 곡률반경) >> 전자의 Debye 길이 이어야 한다) 하기 힘든 경우는 전압분포를 나타내는 식(2)와 쉬스의 두께를 표시한 식(3)이 주어진 구조에 맞도록 해석적 방법<sup>4,6)</sup> 혹은 수치해석적 방법을 이용하여 다시 구해져야 한다.

위에서 구한 식에 실제장치에서 가능한 파라메타들을  $n_e \sim 5 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$ ,  $T_e \sim 3 \text{ eV}$ ,  $\phi_w = 50 \text{ kV}$ 로 가정하면

전자의 Debye 길이가,  $\lambda_{ye} \sim 0.6 \text{ mm}$ 이고, 이때의 쉬스두께는

$$S_E = \lambda_{ye} (e\phi_w/T_e)^{3/4} \sim 88 \text{ cm}$$

$$S_I = \lambda_{ye} (2e\phi_w/T_e)^{1/2} \sim 10 \text{ cm}$$

가 된다. 이 예에서 쉽게 알 수 있는 것은, 펄스대신 직류 고전압을 표적에 가한 경우 플라즈마의 쉬스가 평형상태에 도달하게 되고, 이때의 쉬스두께가 너무 커져서 플라즈마 용기가 대형이 되어야 할 뿐만 아니라 2개 이상의 표적재료를 삽입할 경우 쉬스의 간섭현상을 막기위한 표적재료의 이격거리가 멀어지게 되므로 배치공정 (batch process)의 적용이 곤란하게 되는 문제점 등이 있다.

#### 4. 플라즈마 쉬스를 이용한 이온주입 장치

그림 2-A에서 개념적으로 간단히 표시한 장치를 구체적으로 표시하여 그림 5에 나타냈다. 현재 제작 중인 장치는 재료표면의 기계적 특성개선을 위해 주로 질소나 메탄 등의 기체를 이용한 이온주입 공정에 목표 표를 두고 (반도체 응용은 제외) 직경 40cm, 높이 50cm의 원통으로 진공챔버를 구성하였다. 챔버 내부에는 텅스텐 필라멘트를 장착하여 가열된 필라멘트로부터 방출되는 열전자를 이용하여 플라즈마를 생성시키게 된다. 챔버의 하단부에는 진공밀폐된 고전압용 전극을 설치하고 전극에 시료 고정용 판을 설치하여 표적재료를 고정시키고 외부에서 펄스 모듈레이터를 이용하여 고전압 펄스(-10~80KV)를 인가시킨다.

진공챔버의 외벽은 영구자석을 배열하여 플라즈마의 포획 (confinment)이 향상되도록 하였다<sup>8)</sup>. 이 장치는 기체압력이  $\sim 5 \times 10^{-6} \text{ torr}$  또는 그 이상에서 플라즈마를 생성시킬 수 있고 플라즈마의 밀도도 필라멘트의 방전 전류를 조절함으로써 약  $10^{11} \#/\text{cm}^2$ 까지 조절할 수가 있다. 그림에 표시된 증발용 전원장치는 주입할 원소가 기체가 아니고 금속이온일 경우에 사용하기 위한 것이며 이를 이용할 경우 혼합 이온주입법 (ion mixing implantation) 또는 박막증착용으로도 사용이 가능하다.

Langmuir 탐침은<sup>9)</sup>이온 주입공정중에 플라즈마의 밀도 및 전자온도를 측정하기 위한 것이며 적외선 파이로메타는 공정 중에 표적재료의 온도를 측정하기

위한 장치이다. 플라즈마 생성을 위해서는 그림에서 표시한 필라멘트 방전법 이외에도 마이크로 웨이브나 고주파를 이용한 방전법을 쓸 수도 있다.

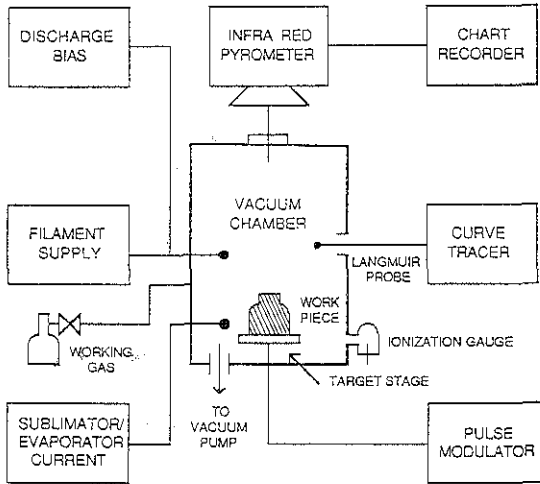


그림 5. 플라즈마 쉬스를 이용한 이온 주입장치의 상세 블록 개념도

앞 절에서 설명한 이온격자 모델에 의한 쉬스두께를 고려하면 본 장치의 이온주입을 위한 표적설치 유효 공간은 챔버의 중앙에서 직경 약 25cm, 높이 약 25cm 정도이며 시료의 이온주입에 소요되는 시간은 플라즈마 조건, 표적의 허용온도 상승한계, 펄스 모듈레이터의 주파수 및 전류, 그리고 이온의 주입밀도 등에 따라 결정되어야 한다.

## 5. 결 론

표면의 기계적 특성을 개선시키는 탁월한 처리 방법으로 알려진 이온주입법은 그 응용의 범위가 매우 광범위하나 현재 상용화 된 장비의 경제적, 기술적 여건으로 인하여 매우 제한된 범위로 이용이 되고 있는 실정이다. 본 논문에서 설명한 플라즈마 쉬스를 이용한 새로운 이온주입법은 이러한 기존의 빔 가속형 이온 주입장치와 비교하여 다음과 같이 그 특징을 요약할 수 있다.

- 1) 비 가시직선적이온주입 (Non-line-of-sight)
- 2) 이온 빔의 방향조절장치가 필요없다.

- 3) 펄스당 전류용량이 크다. ( $>10$  A)
- 4) 표적재료의 그림자효과 및 스파타링이 매우 적다. (마스크 설치가 필요없음)
- 5) 표적재료의 균일주입을 위한 구동장치가 필요 없다.
- 6) 표적재료의 형상에 무관
- 7) 플라즈마의 이온 종류에 따라 증착과 주입을 병행할 수 있다.

위와 같은 특징에서 볼 수 있듯이 플라즈마의 쉬스를 이용한 이온주입장치는 그 구조가 비교적 간단하고 소규모이며 운전이 용이하여 이온주입을 통한 재료의 표면 특성 개선의 이용범위를 확대시킬 수 있는 장치라 하겠다.

## 참 고 문 헌

1. S. Namba (Ed.), "Ion Implantation in Semiconductors", Plenum Press, New York (1974)
2. S. Thomas Prcaus, "Ion Implantation Metallurgy", Physics Today, Nov. 37 (1984) 38  
P. Sioshansi, R. W. Oliver, and F. D. Matthews, "Wear Improvement of Surgical Titanium Alloys by Ion Implantation", J. Vac. Sci. Technol., O-1A3(6) (1985) 2670  
L. E. Rehn, S. T. Picaroux, and H. Wiedersich, "Surface Alloying by Ion, Electron, and Laser Beams", American Society for Metal, Ohio (1987)
3. J. R. Conrad, J. L. Radtke, R. A. Dodd, F. J. Worzala, J. Appl. Phys. 162, (1987) 4591  
J. R. Conrad, R. A. Dodd, F. J. Worzala, and X. Qiu, Surface and Coatin Technol. 136 (1988) 927
4. F. F. Chen, "Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion", Vol. 1, Plenum Press, New York, (1984) 290
5. A. T. Forrester, "Large Ion Beams", John Wiley & Sons, New Yore, Ch.2 (1988)
6. R. H. Varey and K. F. Sander, J. Appl. Phys. 12 (1969) 541  
J. A. Andrews and R. H. Varey, Phys. Fluids, 114 (1971), 339

- 
7. J. R. Conrad, J. Appl. Phys. 162 (1987) 777
  8. M. H. Cho, N. Hershkowitz, and T. Intrator, J. Vac. Sci. Technol.1A6 (1988) 2978
  9. N. Hershkowitz, "How Langmuir Probes Work", in Plasma Diagnostics, Vol.1 O. Auciello and D. Flamm (ed.), Academic Press, New York (1989)