

## SEM 단면 시료 제작을 위한 플라즈마 이온원의 구조

원종한<sup>a</sup>, 장동영<sup>b\*</sup>, 박만진<sup>c</sup>

## Structure of a Plasma Ion Source for a Cross-Section SEM Sample

Jong-Han Won<sup>a</sup>, Dong-Young Jang<sup>b\*</sup>, Man-Jin Park<sup>c</sup><sup>a</sup> Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science & Technology,  
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea<sup>b</sup> MSDE Program, Seoul National University of Science & Technology,  
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea<sup>c</sup> Research Center for Charged Particle Beam, KEMCTI,  
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	23	January	2015
Revised	23	June	2015
Accepted	10	July	2015

## Keywords:

Ion source  
Plasma current  
Ion beam  
Scanning electron microscope  
Sputter yield

## ABSTRACT

This study researched the structure of the source of an ion milling machine used to fabricate a scanning electron microscope (SEM) sample. An ion source is used to mill out samples of over 1 mm dimension using a broad ion beam to generate plasma between the anode and cathode using a permanent magnet. To mill the sample in the vacuum chamber, the ion source should be greater than 6 kV for a positive ion current over 200  $\mu$ A. To discover the optimum operating conditions for the ion miller, the diameter of the extractor, anode shape, and strength of the permanent magnet were varied in the experiments. A silicon wafer was used as the sample. The sputter yield was measured on the milled surface, which was analyzed using the SEM. The wafer was milled by injecting 1 sccm of argon gas into the 0.5 mTorr vacuum chamber.

## 1. 서론

이온빔의 의한 시료 제작 방법으로는 집속이온빔(focused ion beam) 가공을 이용하여 0.1  $\mu$ m~수 10  $\mu$ m까지 정밀하게 가공할 수 있는 방법과, 폭 넓은 이온빔(broad ion beam)을 조사하여 0.1~1 mm의 넓은 범위의 시료를 제작하는 방법이 있다.

최근에는 폭 넓은 이온빔을 조사하고 차폐판을 사용해 단면시료를 제작하는 이온밀링법이 개발되어 급속히 확대 되고 있으며 일반적으로 사용되는 장치는 1 mm 정도의 단면시료를 제작하는 수준이지만 더욱 폭 넓은 범위를 제작할 수 있는 장치도 시판되기 시작

했다<sup>[1]</sup>.

본 연구에서는 폭 넓은 이온빔을 이용하여 주사전자현미경(scanning electron microscope)시료를 제작하는 플라즈마 이온원(ion source)에 대한 연구이며 이온원에서 인출된 이온빔을 사용하여 시료의 단면 가공한다.

이온빔 빔 연마(ion beam milling)는 본래 화학 연마가 어려운 세라믹이나 반도체 시편을 연마하기 위해 시작되었으나 현재는 이들은 물론 금속 등 여러 재료들의 연마에 이용되는 가장 일반적인 방법이다. 특히 다층 박막 시편의 경우 기관은 물론이고 다층 박막이 다양한 재료로 구성된 여러 층으로 구성된 시편에서도 이온빔을

\* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6450

Fax: +82-2-976-6475

E-mail address: [djang@seoultech.ac.kr](mailto:djang@seoultech.ac.kr) (Dong-Young Jang).

사용하여 연마하는 경우가 일반적이다<sup>[2]</sup>.

플라즈마 이온원을 이용한 단면시료 제작은 이온원에서 방출된 이온빔이 시료에 충돌하여 원자를 분출하는 스퍼터링(sputtering) 방법으로 보통 아르곤(Ar)과 같은 불활성 기체의 이온 혹은 원자들을 가속시켜 만든다. 이온빔의 가속에너지와 전류는 이온원의 스퍼터율(sputter yield)을 결정하는 중요한 요소이며 이 스퍼터율은 연마 속도와 직접적인 연관이 있는 값이다<sup>[2]</sup>.

이온원은 글로우 방전(glow discharge)영역에서 플라즈마를 발생시킨다. 이 때 양극(anode)의 구조는 원통형의 할로우(hollow)형으로 이 구조는 전류밀도가 증가하여 고밀도의 플라즈마가 얻어지는 장점이 있다. 이온원에서 인출된 이온의 에너지를 높이기 위하여 방전 발생 후 할로우형 양극에 전압과 전류를 증가시켜 이온을 가속시킨다.

최근 산업용으로써 주사전자현미경의 단면 시료를 제작할 수 있는 장비들이 개발되고 있으며 이온원의 스퍼터링율은 장비의 성능을 결정한다. 상용화된 장비들마다 약간의 차이는 있지만 일반적으로 가속전압은 2~8 kV를 사용하여 시료의 단면을 가공한다. 본 연구에서는 단면을 가공하기 위한 이온원의 구조로 가속전압을 6 kV 이상으로 설정하였으며, 이때 15 mm 떨어진 패러데이 컵(Faraday cup)에서의 측정 전류를 200  $\mu$ A 이상으로 설정하여 이를 만족하기 위한 이온원의 구조를 연구하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 이온원 구조

Fig. 1은 이온원의 구조이다. Ar 가스 유입 후 고전압을 인가하여 양극과 음극 사이에서 방전을 일으킨다. 음극은 그라운드와 동일한 전위를 갖고 양극은 0~7 kV의 전압을 인가할 수 있다.

플라즈마는 원통형인 양극에 존재하며 전자의 방향은 양전위인 양극 방향으로 향한다. 플라즈마의 밀도를 높이기 위해 사용한 영구자석의 영향으로 전자는 자기장에 의해 구속되어 수명을 늘린다.

이온의 인출은 그라운드 전위인 음극과 진공 챔버(vacuum chamber) 내부에 존재하는 시료를 향하여 양방향으로 가속한다. 이온원에서 15 mm 떨어진 시료보다 양극에서 2 mm 떨어진 가까운 음극을 향해 많은 양의 이온이 향한다. 가속된 이온은 시료와 음극 지속적인 충격을 가한다. 이로 인하여 시료와 음극에서 떨어져 나온 원자나 분자가 이온원이 내부에서 절연을 파괴하는 현상이 발생할 수 있다. 이를 방지하기 위하여 양극과, 추출기(extractor) 부분을 절연체로 보호하여 이온원의 보호하였다. Fig. 1의 이온원은 외경  $\Phi$ 60 mm, 길이 80 mm의 소형의 크기를 가진다.

이온원의 방전은 DC 방전으로 사태 전압(breakdown voltage)은 방전에 사용하는 기체의 종류와 기체 압력, 용기의 크기에 의해

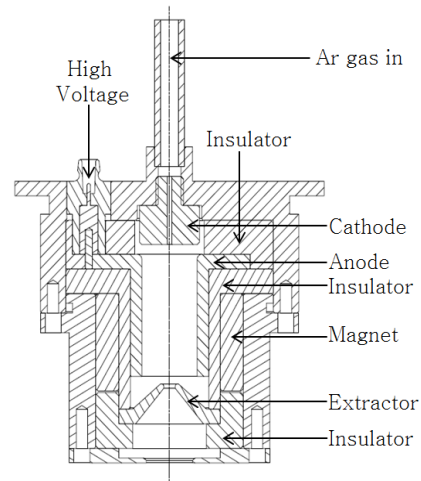


Fig. 1 Configuration of ion source

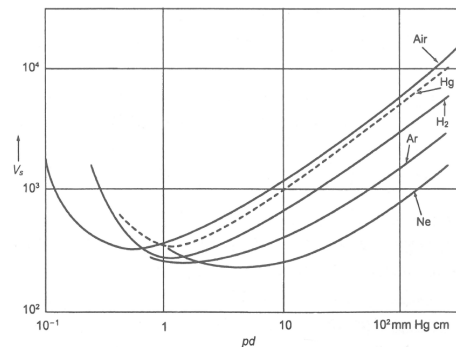


Fig. 2 Paschen curve of various gases<sup>[3]</sup>

결정된다. 기체 압력과 전극 사이의 간격에 대한 방전의 사태 전압은 다음과 같이 표현된다<sup>[3]</sup>.

$$V_b = \frac{C_1(pd)}{C_2 + \ln(pd)} \quad (1)$$

여기서  $d$ 는 전극의 간격이며  $C_1, C_2$ 는 기체 종류에 따라 변하는 상수이다. 식 (1)에 의하여 큰  $pd$  값에서는 사태 전압이  $pd$ 에 비례한다. 위와 같은 사태 전압의  $pd$  의존성을 Pachen 법칙이라 하며 이는 DC glow 방전의 이차 전자의 효과도 포함된 것이다. 전극 사이의 간격이 작거나 압력이 낮으면 음극으로부터 방출된 이차 전자가 양극에 도달하게 된다. 하지만 기체들과 거의 충돌을 하지 않아 이차 전자를 만들 수 있을 정도의 이온들을 만들지 못한다. 한편 압력이 높으면 잦은 충돌로 전자가 이온들을 만들 정도의 충분한 에너지를 전기장으로부터 얻지 못하게 된다. 또한 전극 사이의 간격이 매우 크면 생성된 이온의 일부만인 음극에 도달하여 이차 전자를 방출시킨다.  $pd$ 의 두 극단의 경우 이온화 확률이 낮고 플라즈마를 유지하기 위한 사태 전압은 높게 된다.

Fig. 2는 Paschen 그래프로 방전이 시작되는 전압  $V_b$ 와 압력  $p$ , 전극간격  $d$ 의 관계가 표시되어 있다. Fig. 2의 그래프와 같이 내부

분의 기체의 최소 전압은 100~500 V 사이이며  $10^{-1}$ ~10 Torr.cm 이다. Fig. 1에 사용된 이온원의 전극간격 양극과 음극 사이의 간격 ( $d$ )는 2 mm이며 압력  $p$ 는 0.5 mTorr로 Fig. 2의 그래프보다 낮은 압력이다. 방전이 발생하였으며 압력이 낮기 때문에 방전개시 전압  $V_s$ 은 Fig. 6의 그래프와 같이 2,000 V 이상에서 방전이 발생한다.

### 2.2 양전극 구조 실험 및 결과

원통의 할로우(hollow 흡통)형 전극을 음극으로 이용하여 방전시키는 방법은 다음과 같은 메커니즘을 통해 이온화 효율을 높인다. 할로우 음극에서 이온충격으로 방출시킨 2차 전자는 쉬스(sheath)에 의해서 반경 방향으로 가속되며, 그 평균 자유 행정 거리  $\lambda_c$ 가 원통의 직경  $d$ 보다 길게 되면 반대쪽의 음극 면으로 접근하게 된다. 만일 쉬스 두께  $d_c$ 가  $d_c \leq d/2$ 가 되면 음전극 앞 쉬스(sheath) 내에서 전자는 운동에너지를 잃고 쉬스(sheath)의 음전위에 의해서 반사되어 본래의 음극 면을 향하여 되돌아 가속된다. 즉 원통 내의 포텐셜(potential) 우물 안에 높은 에너지의 전자를 가두는 효과가 나타나서, 쉽게 빠져나가지 못하는 전자에 의한 이온화 횟수가 증가하여 플라즈마 밀도는 높아지게 된다. 이 장치의 양전극은 전자를 흡수하는 역할을 하므로 할로우 음극의 효과를 강화하기 위해서는, 플라즈마를 가능한 넓은 음전극으로 덮고 양전극의 면적은 작게 하는 것이 중요하다<sup>[4]</sup>. Fig. 3의 할로우 음극 특성을 이용하여 양극의 형태도 Fig. 4와 같이 3가지 형태의 할로우 양극 구조를 설계 하였다. Fig. 4의 type (a)는 100°의 각도로 이온을 양극 내부에서 집속시킨 후 추출기로 이온을 인출시키는 방법이다. Fig. 4의 type (b)는 이온이 추출기로 방출될 때 Fig. 4의 type (a)와는 반대 방향으로 100° 각으로 양극에서 발산된 이온을 추출기로 인출시키는 방법이다. Fig. 4의 type (c)는 구조적으로 이온을

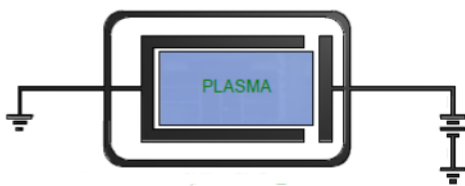


Fig. 3 Hollow cathode<sup>[4]</sup>

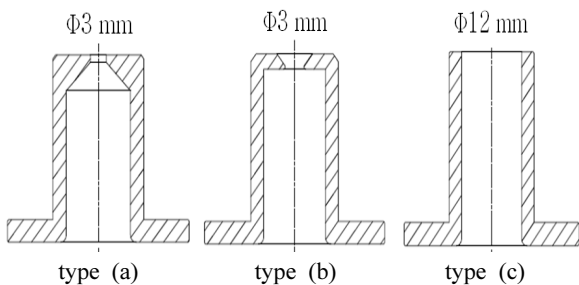


Fig. 4 Selected as the structure of the anode

집속과 발산시키지 않고  $\Phi 12$  mm의 홈을 통하여 추출기 방향으로 이온을 인출시키는 방식을 사용하였다.

Fig. 5의 그래프는 Fig. 4의 양전극 (a), (b), (c) type을 적용시켜 15 mm 떨어진 부근에서 패러데이 컵을 사용하여 이온빔의 전류를 측정된 결과이다. 측정결과 양전극 type (c)에서 가장 많은 이온의 인출이 이루어졌다. 플라즈마의 발생 공간을 확장시켜 추출기를 통하여 이온빔을 인출시키는 구조에서 300  $\mu A$ 가 넘는 전류를 측정할 수 있었으며 type (a), (b)에서도 목표로 설정한 200  $\mu A$  이상의 전류량 측정을 하였다. Fig. 6은 이때의 플라즈마 발생 전류를 측정된 결과이다. 초기 플라즈마 발생은 type (c)을 기준으로 2 kV의 전압에서 발생하였으며 이 후 플라즈마 전류 3.0 mA까지 전압을 증가시키며 전류를 측정하였다. Fig. 7의 최대 전류 측정 그래프와 같이 이온원의 직류전압을 7 kV로 고정하고 Ar 가스의 유량을 증가시켜 플라즈마 전류를 향상시킨 결과 3.0 mA이상으로 전류가 증가할 경우 패러데이 컵에서 측정되는 전류의 양은 감소하는 것을 확인하여 플라즈마의 전류량이 향상되지만 추출기를 통하여 시료로 인출되는 이온의 양은 감소하여 효율적인 이온의 인출은 이루어지지 못한다. 이로 인하여 이온원의 최대 전류량은 3.0 mA이다.

### 2.3 추출기 홈 크기(extractor hole size)의 선정 및 결과

이온빔 인출단의 추출기 홈의 크기는 작을수록 낮은 압력, 적은

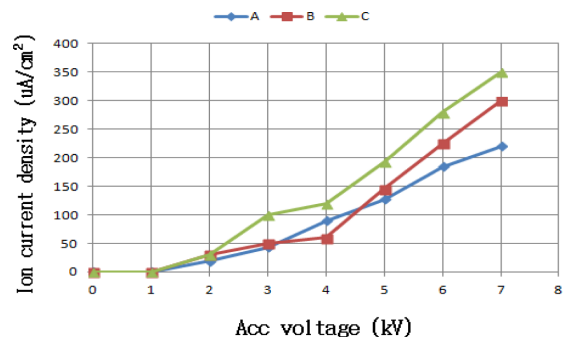


Fig. 5 Ion beam current density measurement of extractor  $\Phi 2.5$  mm

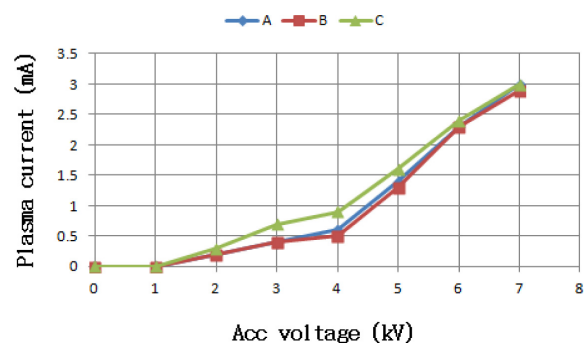


Fig. 6 Plasma current measurement of extractor  $\Phi 2.5$  mm

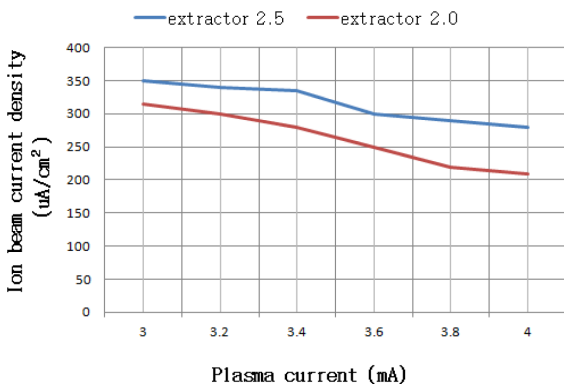


Fig. 7 Maximum current measurement of ion source

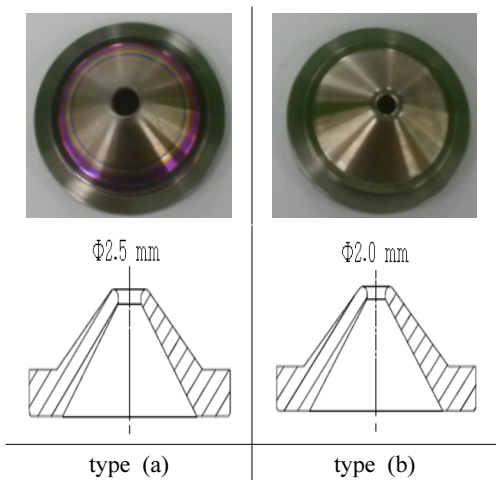


Fig. 8 Variable hole size of extractor

유량으로도 방전을 일으키기 쉬운 장점이 있지만 이온을 외부로 인출하기가 힘들어진다. 반대로 홈의 크기가 클수록 방전을 일으키기 위해서는 높은 압력과 전압이 필요하다. 이 경우 많은 양의 이온을 인출하여 전류는 증가하지만 이온빔이 집속하지 못하고 발산하는 경우도 존재할 수 있다. 이 경우 스퍼터링 수율이 낮아져 시료의 가공 속도에 영향을 미친다. 실험에서는 추출기의 크기가 Φ2.0 mm보다 작은 경우 목표인 200 µA의 전류를 인출하지 못하며, Φ 3.0 mm이상의 홈 크기는 이온이 추출기를 통과하면서 집속되지 못하고 확산된다. Fig. 8과 같이 Φ2.0 mm, Φ2.5 mm의 2 type으로 실험을 진행하였다. Fig. 5, Fig. 9에서 추출기의 크기에 대하여 각각의 전류량을 측정된 결과 모두 목표의 200 µA를 초과하였다.

추출기 Φ2.5 mm의 Ar 가스의 유량은 1.0 sccm이며 실험 압력은  $5.0^{-4}$  Torr이며, 추출기 Φ2.0 mm의 유량은 0.6 sccm이며 실험 압력은  $4.0^{-4}$  Torr이다. 플라즈마의 전류는 각각 3.0 mA를 넘지 않도록 유량을 조절하여 실험을 한 결과 추출기 Φ2.0 mm에서 보다 적은 유량과 1 kV의 낮은 전압에서 방전이 발생하였고 패러데이 컵에서의 측정 결과는 추출기 Φ2.5 mm에서 측정 전류가 약 50 µA 이상 높게 측정되는 것을 확인하였다.

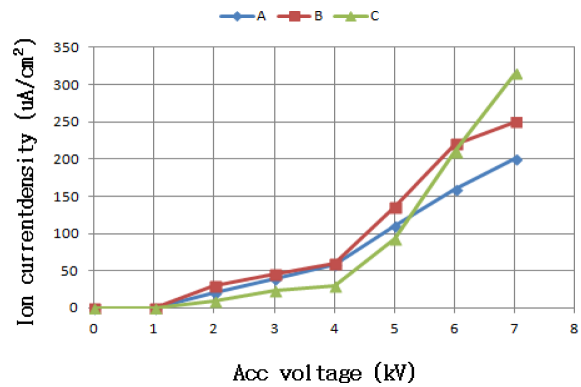


Fig. 9 Ion beam current density measurement of extractor Φ2.0 mm

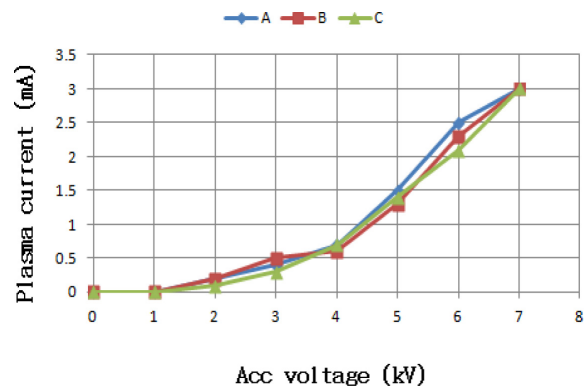


Fig. 10 Plasma current measurement of extractor Φ2.0 mm

## 2.4 영구자석(permanent magnet) 선정 및 실험 결과

전기장이 없는 상태에서 플라즈마에 외부로부터 자기장  $B$ 가 인가되었을 때 전하  $q$ 는 입자 속도  $v$ 와  $B$ 가 만드는 면의 수직 방향으로 자기력을 받는다. 하전입자가 전기장에서 받는 힘과 자기장에서 받는 힘을 로렌츠의 힘(Lorentz force)이라 한다. 순수 자기장 안에서의 하전입자의 운동 방정식은 다음과 같다<sup>[4]</sup>.

$$m \frac{dv}{dt} = qv \times B \quad (2)$$

하전입자가 움직이면서 흐르는 전류가  $qv$ 이므로 우변인 로렌츠의 힘(자기력)은 자기장  $B$ 에 흐르는 전류  $I$ 가 받는 힘과 본질적으로 같다. ( $I \times B$ : 플레밍의 왼손법칙) 이를 이용하여 영구자석을 이온원에 적용하면 낮은 압력에서 높은 밀도의 플라즈마를 발생시킬 수 있다<sup>[4]</sup>.

이온원에 적용한 영구자석은 4가지 type으로 구분하였다. Fig. 11 type (a)는 영구자석을 사용하지 않고 실험을 하였으며 Fig. 11 type (b)는 영구자석 중 비교적 자력이 약하지만 온도에 대한 안정성이 높은 페라이트(ferrite)자석을 사용하였으며 Fig. 11 type(c), (d)는 자력이 가장 강한 네오디움(Neodymium) 자석으로 실험을

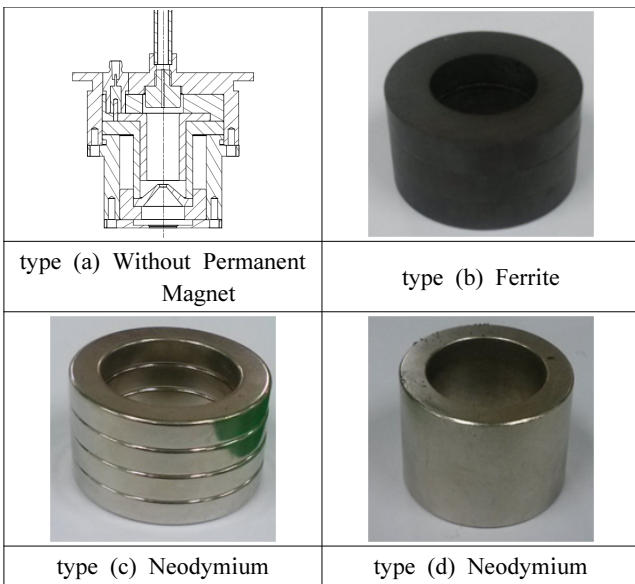


Fig. 11 Selection of permanent magnet due to the temperature and gauss

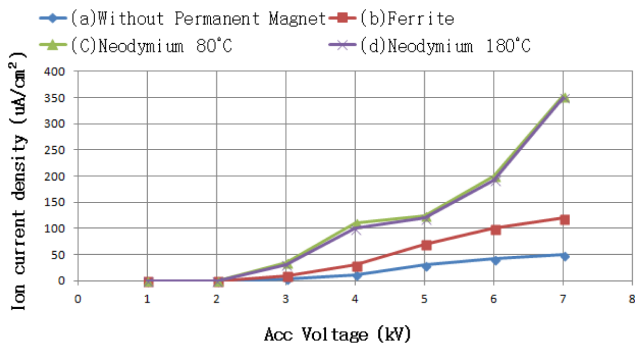


Fig. 12 The current due to the change in the gauss of permanent magnet

진행하였다. Fig. 11 type (c) 네오디움 자석의 상용온도는 80°C이며 Fig. 11 type (d)는 고온용의 특수 네오디움 자석으로 180°C의 온도까지 사용가능하다. 위의 Fig. 11의 자석들은 외경  $\Phi 22$  mm, 내경  $\Phi 32$  mm, 길이 20 mm로 동일한 크기를 가진다. 자력 측정을 위하여 가우스미터(gauss meter)를 사용하여 원형 자석의 축 방향으로 가우스(gauss)를 측정하였다.

Fig. 12는 실험에 사용된 영구자석의 가우스(gauss)에 따른 전류 측정 결과이다. 전압을 증가시키며 플라즈마 전류를 측정하며 실험을 진행하였다. Fig. 12의 그래프와 같이 자력이 강한 type (c), (d) 네오디움 자석 사용 시 가장 높은 전류량을 확인 할 수 있었으며 Ar 가스의 유량을 증대시켜 높은 압력의 플라즈마 방전보다 영구자석을 사용하는 것이 효율적이라는 것을 알 수 있다. Table 1에서 type (a), (d)의 유량을 비교한 결과 1.5 sccm 적은 유량으로도 7배가 넘는 이온 전류의 인출을 확인 할 수 있었다.

초기 실험은 type (c)의 상용온도는 80°C의 네오디움 자석으로

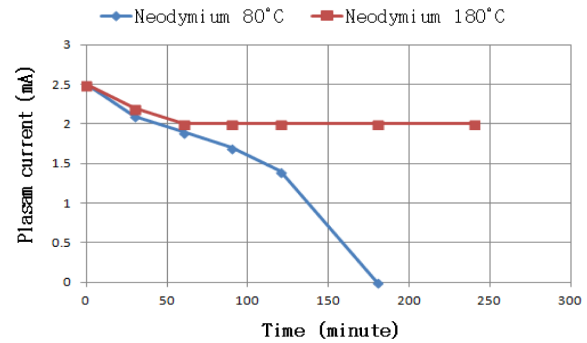


Fig. 13 The current change with neodymium magnet operating temperature

Table 1 Emission efficiency of the ion beam to be due to the gauss permanent magnets

Type	Gauss	Ar gas (sccm)	Vacuum (Torr)	Ion beam current/ Plasma current (%)
(a)	0	2.5	$1.5^{-4}$	1.6 %
(b)	300	1.8	$8.5^{-4}$	4 %
(c)	1200	1.0	$5.0^{-4}$	11.8 %
(d)	1150	1.0	$5.0^{-4}$	11.8 %

플라즈마 실험을 진행한 결과 플라즈마 발생 후 열에 의하여 일정한 자력을 유지하지 못하고 가우스(gauss)가 감소하는 문제가 발생하였다. 이로 인하여 동일한 유량(1.0 sccm)과 동일 전압(7 kV)에서 Fig. 13의 그래프와 같이 플라즈마 전류가 감소하였다. 이를 해결하기 위하여 Fig. 11 type (d)의 상용온도 180°C의 네오디움 자석을 제작하여 실험을 진행하였다. 그 결과 Fig. 13의 결과와 같이 실험 시작 후 초기 1시간 동안 플라즈마의 안정화까지 진공과 열에 의해 0.5 mA 감소하였고 이후 3시간 동안 동일 유량과 동일 전압으로 일정하게 플라즈마 전류를 유지하였다. 이로 인하여 상용온도 80°C의 네오디움 자석은 이온원에 적합하지 않다는 결론을 내렸다.

2.4 이온원을 이용한 시료 단면 가공 실험 및 결과 Fig. 14는 실리콘 웨이퍼의 단면을 이온원을 이용하여 가공 후 광학현미경으로 측정된 결과이다. 가공 후 시료의 단면을 분석하였다. Fig. 14, Fig. 15의 실리콘 웨이퍼는 가로 방향으로 700  $\mu\text{m}$ 의 두께를 가지며 가공 높이를 100  $\mu\text{m}$ 로 설정하여 가공을 진행하였다. 이온원의 전압을 6 kV 플라즈마 전류를 2.1 mA의 조건에서 가공한 결과 Fig. 14(a)는 2시간동안 세로 방향으로 220  $\mu\text{m}$ 를 가공하였고, Fig. 14(b)는 3시간 동안 세로 방향 370  $\mu\text{m}$  가공하였다.

실리콘 웨이퍼 가공 후 SEM 관찰 결과 Fig. 14(a)에서 가로 방향으로 가공된 길이가 약 1 mm로 측정이 되었다. 이로 인하여 이온원의 빔 크기(beam spot size)를 1 mm로 확인하였다. Fig. 15(a), (b)의 SEM 영상은 가공 후 실리콘의 단면을 비교한 영상이다. Fig. 15(a)는 직선방향으로 실리콘 웨이퍼를 가공하였으며

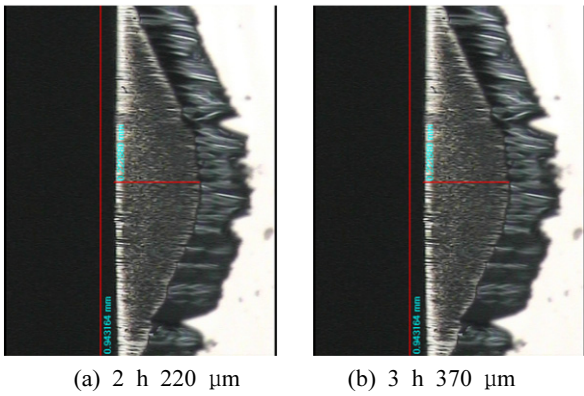


Fig. 14 Sputtering yield measurement of Si wafer

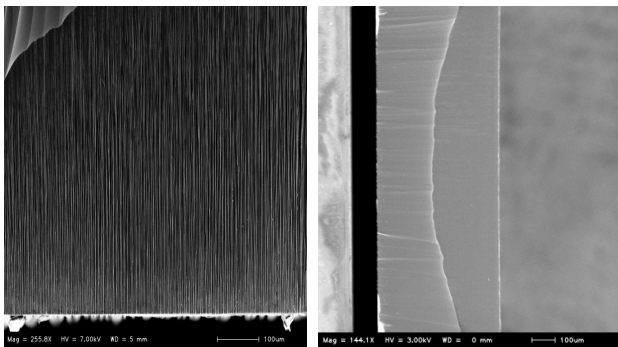


Fig. 15 SEM measurements Si wafer processing

Fig. 15(b)는 가공 공정 중 시료 거치대(stage)를 좌·우 15°씩 회전, 총30°를 회전시키며 가공을 진행하였다. Fig. 15(a)의 단면 분석 결과 실리콘 웨이퍼 표면에 일정한 방향으로 결이 생기는 것을 발견하였다. 이는 가공이 진행되는 시간 동안 이온원에서 가속된 이온이 실리콘 웨이퍼에 동일한 방향으로 충돌하기 때문이다. 더 나은 표면을 얻기 위하여 스텝 모터(step motor)를 이용하여 가공 도중 회전 공정을 추가한 영상이 Fig. 15(b)이다. 그 결과 Fig. 15(a)보다 깨끗한 단면을 얻을 수 있었다. Fig. 15(b)의 가공 조건은  $5.0^4$  Torr의 압력, 전압 6 kV, 이때의 플라즈마 전류는 2.1 mA이며 5시간 가공한 결과이다. 가공 결과 Fig. 15(b)의 시료는 세로 방향으로 2.0 mm, 가로 방향 280 μm를 가공하였다. Fig. 15(b) 영상으로 이온원의 스퍼터율(sputter yield)을 측정하였다.

Fig. 16은 이온 에너지에 따른 실리콘의 스퍼터율을 나타낸 그래프이며 가스는 비활성 기체이다. Fig. 15(b)의 영상에서 가공된 실리콘 웨이퍼의 부피는  $0.3 \text{ mm}^3$ 이며 Ar가스 1 sccm, 이온원에서 15 mm떨어진 패러데이 컵에서의 측정전류는 270 uA이며 가공시간은 5시간이다. 이를 기준으로 스퍼터율을 계산하였다. 스퍼터율(제거된 원자 수/입사 이온의 수)에서 제거된 원자 수는  $1.5 \times 10^{19}$ 이며 입사 이온의 수는  $3.02 \times 10^{19}$ 로 계산결과 스퍼터율은 0.5 Atoms/Ion이다. Fig. 16의 그래프에서 6 eV의 Ar 가스는 이상적

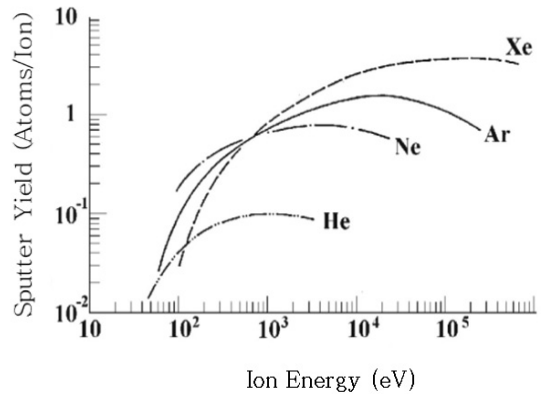


Fig. 16 Sputter yields of silicon as a function of ion energy for noble gas ions at normal incidence<sup>[4]</sup>

으로 1 Atoms/Ion의 스퍼터율을 가진다. 실험에 사용된 이온원은 Fig. 16 그래프와 비교하여 6 eV에서 50%의 효율을 가진다.

### 3. 결론

본 연구에서는 이온빔을 이용하여 시료의 단면을 가공하는 목적의 이온원 구조를 연구하였으며 이온원의 성능으로 직류 전압 6 kV 이상, 15 mm 떨어진 패러데이 컵에서의 이 이온빔 전류를 200 uA 이상으로 설정하였다. 이를 만족시키는 이온원의 구조를 찾기 위하여 양극(anode), 추출기 홈 크기, 영구자석의 가우스를 변경하며 최적의 이온원 구조를 찾는 실험을 진행하였다. 이온원의 양극의 구조를 Fig. 4와 같이 type (a), (b), (c) 3 type으로 실험을 진행하였다. 추출기 홈 크기는  $\phi 2.0 \text{ mm}$ ,  $\phi 2.5 \text{ mm}$  2가지 type, 영구자석은 Fig. 11과 같이 type (a), (b), (c), (d)으로 나누어 이온원의 구조를 찾았다. 그 결과 Fig. 4의 type (c) 양극 구조는 플라즈마의 영역을 추출기부분까지 확장시킨 것으로 6 kV 이상에서 Fig. 4의 type (b), (c)보다 급격히 전류밀도가 증가하였다. Fig. 8 type (b)의  $\phi 2.5 \text{ mm}$ 의 추출기에서 전류 밀도가  $\phi 2.0 \text{ mm}$ 보다 증가하였고 Fig. 11 type (d) 네오뎴 자석으로 전류 밀도가 높고 이온원을 안정적으로 사용하였다. 이때 이온원은 최대 직류전압 7 kV까지 사용 가능하며 15 mm 떨어진 패러데이 컵에서의 전류측정 결과 최대 350 uA까지 측정되었다.

이온원의 플라즈마의 전류는 최대 3.0 mA이며 유량과 고압을 조절하여 3.0 mA 이상 전류를 향상시켜도 패러데이 컵에서의 전류증가는 발생하지 않았다. 전류 밀도를 기준으로 최적의 이온원 구조를 선정 후 실리콘 웨이퍼의 가공 실험을 진행하였다. Fig. 15(b)의 영상에서 실리콘 웨이퍼는 5시간 동안  $0.3 \text{ mm}^3$ 의 부피만큼 가공되었으며 이를 기준으로 스퍼터율을 측정하였다. Fig. 16 그래프에서 이상적인 Ar의 스퍼터율은 6 eV에서 1이며 실험에 사용된 이온원의 스퍼터율은 6 eV에서 0.5로 Fig. 16 그래프의 50%

의 효율을 가진다.

가공이 완료된 실리콘 웨이퍼의 단면을 분석한 결과 동일한 방향으로 이온빔이 조사됨으로써 Fig. 15(a)와 같이 웨이퍼 단면에 이온빔에 의한 결에 생성되었다. 더 나은 표면을 얻기 위하여 스텝 모터를 이용하여 가공도중 시료를 좌·우로 총 30° 회전시키며 가공한 결과 Fig. 15(b)의 깨끗한 단면을 얻을 수 있었다.

## 후 기

이 연구는 지식경제부가 지원하는 산업원천기술 개발사업 “정밀기계 가공용 고밀도 전자 빔의 고속 청정 finishing 공정기술 개발” 과제로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 말씀을 드립니다.

## References

- [1] Tomio, H., 2011, Sample Preparation Techniques for the Analysis, Japan Institute of Electronics Packaging, 14:2 145~149.
- [2] Jeong, S. J., 2000, A Study on TEM Specimen Preparation of Multilayer Materials by Mechanical Polishing, A Thesis for a Master, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Republic of Korea.
- [3] Alfred, G., 2003, Cold plasma in Materials Fabrication, Cheongmoongak, Republic of Korea.
- [4] Yang, S. H., and KIM, G. H., 2006, Plasma electronics, Kyohaksa, Republic of Korea.
- [5] Thermo Fisher Scientific Inc, n.d - no date, 2015, Monatomic depth profiling - Sputter yield, <[http://xpssimplified.com/depth\\_profiling.php](http://xpssimplified.com/depth_profiling.php)>