

# 유도결합형 플라즈마 소스를 이용한 집속 이온빔용 가스 이온원 개발

## Development of Inductively Coupled Plasma Gas Ion Source for Focused Ion Beam

이승훈<sup>1</sup>, 김도근<sup>1</sup>, 강제욱<sup>1</sup>, 김태곤<sup>2</sup>, 민병권<sup>2</sup>, 김종국<sup>1,✉</sup>  
 Seunghun Lee<sup>1</sup>, Do-Geun Kim<sup>1</sup>, Jae-Wook Kang<sup>1</sup>, Tae-Gon Kim<sup>2</sup>, Byung-Kwon Min<sup>2</sup>  
 and Jong-Kuk Kim<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 부설 재료연구소 (Korea Institute of Materials Science)

<sup>2</sup> 연세대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.)

✉ Corresponding author: kjongk@kims.re.kr, Tel: 055-280-3565

Manuscript received: 2010.5.6 / Revised: 2010.7.24 / Accepted: 2010.9.27

Recently, focused ion beam (FIB) applications have been investigated for the modification of VLSI circuit, the MEMS processing, and the localized ion doping. A multi aperture FIB system has been introduced as the demands of FIB applications for high speed and large area processing increase. A liquid metal ion source has problems, a large angular divergence and a metal contamination into a substrate. In this study, a gas ion source was introduced to replace a liquid metal ion source. The gas ion source generated inductively coupled plasma (ICP) in a quartz tube (diameter: 45 mm). Ar gas fed into the quartz was ionized by a 2 turned radio frequency antenna. The Ar ions were extracted by 2 extraction grids. The maximum extraction voltage was 10 kV. A numerical simulation was used to optimize the design of extraction grids and to predict an ion trajectory. As a result, the maximum ion current density was 38 mA/cm<sup>2</sup> and the spread of ion energy was 1.6 % for the extraction voltage.

Key Words: Inductively Coupled Plasma (유도결합형 플라즈마), Focused Ion Beam (집속이온빔), Gas Ion Source (가스 이온원)

### 기호설명

$\epsilon_0$  = vacuum permittivity [F/m]

$e$  = electron charge [C]

$M$  = ion mass [kg]

$V_a$  = extraction voltage [V]

$d$  = electrode gap [m]

$A$  = ion current collecting area [m<sup>2</sup>]

$\Phi$  = potential of retarding grid

$F(v)$  = ion velocity distribution function

$I(\Phi)$  = ion current measured at Faraday cup as a function

of retarding potential

### 1. 서론

집속이온빔(FIB, Focused Ion Beam)을 활용한 MEMS (Microelectromechanical Systems) 및 반도체 시편 가공 등의 다양한 응용분야가 발생함에 따라 수십 nm 선폭의 초미세 가공 기술 개발이 활발히 이루어 지고 있다. 특히 집속이온빔의 산업적 응용을 위해 단일 집속이온빔의 단점인 느린 처리속도를 개선하고자 대량생산이 가능한 다중 집속 이

온빔 개발이 진행되고 있으며 3x3 다중 개구를 이용한 다중 집속 이온빔 가공 연구를 통해 적용 가능성이 확인되고 있다.<sup>1,2</sup>

다중 집속 이온빔 공정은 각 이온빔의 에너지 균일도 제어가 중요하며 이온원에서 다중 개구로 입사하는 이온빔의 에너지 퍼짐 제어를 통해 고품질 다중빔 발생이 가능하다. 기존의 단일 이온빔 장비에 널리 사용된 액체금속 이온소스(LMIS, Liquid Metal Ion Source)는 빔 퍼짐 및 방사력(emittance) 특성이 다중 집속 이온빔용 이온원로서 부적합하며 이를 대체할 이온원 개발이 필요하다.

액체금속 이온소스에 비해 빔 퍼짐 및 방사력 특성이 우수한 가스 이온원은 다중 집속 이온빔용 이온원으로 적용 가능하며 유도결합형 플라즈마(ICP, Inductively Coupled Plasma)를 이용한 가스 이온원 연구들이 진행되어 왔다.<sup>3-5</sup> Radio frequency (RF) 전원을 통해 발생된 유도결합형 Ar, He 및 H<sub>2</sub> 플라즈마를 사용한 이온원들이 개발되어 왔으며, 주로 100 mA/cm<sup>2</sup> 이상의 고밀도 단일 이온빔을 추출하기 위한 연구들이 수행되었다.

본 연구에서는 13.56MHz 유도결합형 Ar 플라즈마 이온원을 개발하였으며, 이를 다중 개구 집속 이온빔에 적용하여 유도결합형 가스 이온원의 다중 집속 이온빔용 이온원으로서의 적합성에 대해 평가하였다.

## 2. 실험 장비 구성

Fig. 1 의 실험 장치 구성과 같이 직경 45 mm, 높이 85 mm 의 석영 방전관을 사용했으며 그 주위에 직경 1/4 inch 구리관 안테나가 설치되었다. 구리 안테나에 13.56MHz RF 전원(Cesar™, Advanced Energy)이 matching network 을 통해 인가되며 Ar 가스는 방전관 상부로 주입되었다. 석영관 상부는 floating 된 stainless steel(STS)로 막혀있으며 석영관 하부는 2 단 구조로 이루어진 인출 전극 시스템이 부착되었다. 2 단 인출 전극 상부는 직경 0.3 mm extraction aperture 로 구성되었으며 이온빔 인출전압은 DC 고전압 전원을 통해 최대 10 kV 까지 인가되었다. 인출전극 하부에는 상부전극과 2 mm 간격을 두고 접지된 직경 2 mm aperture 가 장착되었다. 또한 인출 전극 내 전기장 분포 해석를 통한 이온빔 인출 성능 최적화를 위해 IGUN 전산모사를 사용하여 extraction aperture 의 각도를 결정하였다.<sup>6</sup> Fig. 2 는 인출 전압이 5 kV 인 경우의 이온빔

수송 전산모사 결과이며 인출전극 하단에서 100 mm 떨어진 위치까지 이온빔이 집속되어 인출됨을 예상할 수 있다.

진공배기는 인출전극 하단 진공챔버에 장착된 TMP(Turbo Molecular Pump)를 통해 이루어지며 이온빔 인출 영역의 압력은 최대 10<sup>-7</sup> Torr 까지 배기 가능하다. 가스이온원에서 인출되는 이온빔 전류 밀도는 인출 전극 하단으로부터 10 cm 거리에 위치한 Faraday cup 에 흐르는 이온전류를 picoameter (Keithley, 2410)를 이용해 측정하였다. 이온빔 에너지 분포는 이온 에너지 분석기(IEA, Ion Energy Analyzer)를 통해 측정하였다.

본 연구에 사용된 이온 에너지 분석기는 2 개의 mesh grid 로 구성되었으며 이온 에너지 분석기를 통해 측정된 이온전류를 통해 이온 에너지 분포 곡선을 얻었다.

가공된 표면의 형상은 optical phase-shifting interferometry (New view 6300, Zygo)를 사용하여 측정하였다.

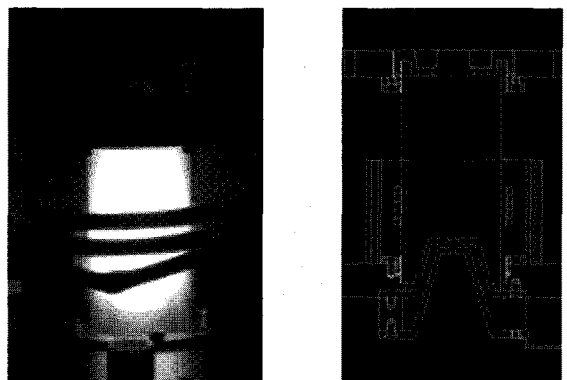


Fig. 1 Image(left) and schematic (right) of ICP source

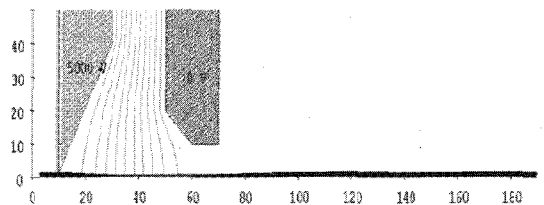


Fig. 2 Simulation result of ion trajectory. [Dimension: mm]

## 3. 인출 전압 및 전력에 따른 이온빔 전류 밀도 변화

Fig. 3 은 인출 전압 및 RF 전원 출력에 따른

이온빔 전류밀도 변화를 나타낸다. RF 전원 출력이 50 W 에서 150 W 까지 증가함에 따라 인출 이온빔 전류밀도는 5 kV 인출전압이 인가된 경우 10 mA/cm<sup>2</sup> 에서 25 mA/cm<sup>2</sup> 로, 10 kV 인출전압이 인가된 경우 19 mA/cm<sup>2</sup> 에서 38 mA/cm<sup>2</sup> 로 증가하였으며 RF 전원 출력 증가에 따라 인출 이온빔 전류밀도는 선형적으로 증가함을 확인하였다.

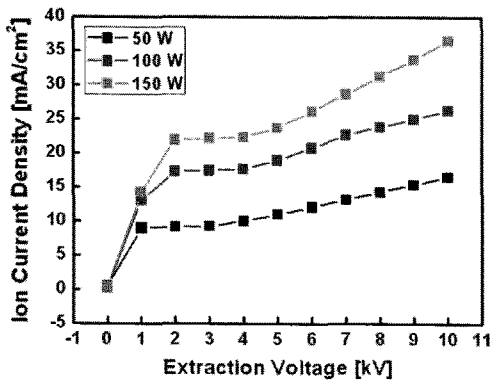


Fig. 3 Ion current density as a function of extraction voltage

플라즈마로부터 이온을 과다 인출시 공간 내 포화된 이온분포에 의해 이온 가속 영역의 전기장이 왜곡되며 인가되는 인출전압이 효과적으로 이온빔 인출 및 가속에 적용되지 못한다. 이 현상을 space charge limited current 라 하며 다음 식과 같다.<sup>7</sup>

$$j = \frac{4\epsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{M}} \frac{V_a^{3/2}}{d^2} \quad (1)$$

식(1)을 사용하여 본 연구에서 사용된 가스 이온원의 space charge limited current 를 산출하면 인출 전압 10 kV 경우 약 215 mA/cm<sup>2</sup> 이며, 10kV 인출전압 인가시 측정된 이온전류 밀도인 38mA/cm<sup>2</sup> 이상의 이온전류 밀도를 전극 구조 개선을 통해 얻을 수 있음을 알 수 있다.

RF 전원 출력 및 인출 전압 증가에 따른 이온빔 전류밀도의 선형적 증가는 전원 출력 증가에 따른 플라즈마 밀도 및 인출 전압 증가에 따른 전기장 구조 변화가 0.3 mm extraction aperture 에 형성되는 meniscus 형상 왜곡에 영향을 주지 않음을 의미한다. 일반적으로 meniscus 는 플라즈마 밀도 증가에 따라 플라즈마 방전관 내부에서 0.3mm extraction aperture 외부로 볼록한 형태로 변형되며,

이에 따라 이온빔 가속단 내의 이온빔 운동 궤적이 방사형으로 변형되어 인출 이온빔 전류 밀도가 감소하게 된다. 본 연구에서는 인가 전력 및 인출 전압 증가에 따른 이온빔 전류 밀도의 감소는 관찰되지 않았지만 인출 전압이 1 kV 미만인 경우 인출 전극 간 형성된 전기장 구조가 이온빔 인출에 적합하지 않아 낮은 이온빔 전류 밀도 값을 나타냈다.

#### 4. 인출 이온빔 에너지 Full Width Half Maximum(FWHM) 측정

Faraday cup 에 수집되는 이온전류는 다음 식으로 나타낼 수 있다.<sup>7</sup>

$$I(\phi) = \frac{eA}{M} \int_{\phi}^{\infty} F(v)dv \quad (2)$$

속도분포 함수를 Faraday cup 에 수집될 수 있는 최저 에너지  $e\phi$  부터 무한대까지 에너지로 적분하면 이온전류의 값을 계산할 수 있다. 식 (2)를 에너지에 대하여 미분하면 속도분포 함수를 얻을 수 있으며 속도분포 함수는 식(3) 같다.

$$F(v) = -\frac{M}{e^2 A} \frac{dI}{d\phi} \quad (3)$$

따라서 retarding grid 에 인가되는 전압에 따른 이온전류 값을 retarding voltage 에 대하여 미분하면 이온 에너지 분포 함수를 얻을 수 있다.

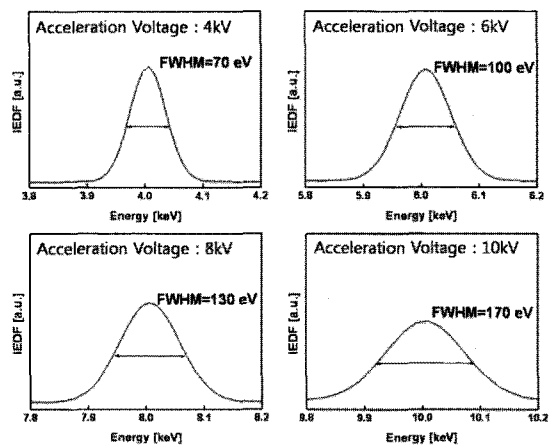


Fig. 4 FWHM of ion energy distribution function

Fig. 4 는 방전관 운전 압력 12 mTorr, 이온빔 출구단 압력  $3.5 \times 10^{-5}$  Torr, RF 전원 출력 100 W 조건에서 인출 전압 증가에 따른 이온빔 에너지 FWHM 을 측정된 결과이다. 인출 전압이 4 kV, 6 kV, 8 kV, 10 kV 인 경우 FWHM 값은 70 eV, 100 eV, 130 eV, 170 eV 으로 측정되었다. 인출 전압 대비 각 FWHM 값을 비교하면 약 1.7 %의 일정한 이온빔 에너지 FWHM 값을 나타냈다. 인출 전압 증가에 따른 인출 이온빔 전류 밀도 증가는 공간 전하 분포를 증가 시킨다. 이에 따라 이온빔 에너지 퍼짐 현상이 발생하였으며 이온빔 에너지 FWHM 값이 증가하였다.<sup>8</sup> 상용 FIB 장비에 널리 사용되는 Ga-LMIS 의 경우, 30 keV 이온빔 인출시 약 10 eV (인출 전압 대비 0.033%) 내외의 이온빔 에너지 FWHM 값을 가지며, 본 연구에서 개발된 가스 이온원을 통한 고품위 다중 이온빔용 이온원 개발을 위해서는 보다 감소된 이온 에너지 퍼짐 특성이 요구된다.

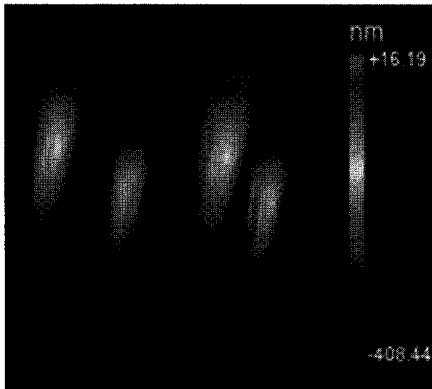


Fig. 5 10 keV Ar ion manufacturing result measured by 3D optical surface profiler(zygo, Newview™). Depth; 380 nm, width; 7 μm, manufacturing time; 30 min

개발된 가스이온원을 이온빔 가공에 이용하기 위해 2x2 배열의 직경 50μm 의 4 개의 홀로 이루어진 다중개구기를 통하여 이온소스에서 방출된 이온빔을 분할시킨 후 다중빔 집속을 위해 설계된 광학계를 이용하여 실리콘 시편에 다중이온빔을 조사하였다.<sup>2</sup> Fig. 5 는 Si(100) 시편에 30 분간 10 keV 의 Ar 이온빔을 이용한 2x2 다중 이온빔 공정 결과이다. 식각 속도는 약 12.7 nm/min 를 나타냈으며 이온빔 가공 깊이는 약 380 nm, 가공 폭은

약 7 μm 였다. 가공된 각 형상의 모양은 균일하였으며, 이는 가스 이온원에서 인출되는 이온빔의 에너지 FWHM 값 범위 내에서는 다중빔을 형성하는 다중빔 column 내에서 빔 퍼짐을 발생시키지 않음을 의미한다. 또한 본 연구에서 개발된 가스 이온원을 다중 개구 집속 이온빔용 이온원으로 사용 가능성을 확인한 결과이다.

### 5. 결론

유도결합형 RF 플라즈마를 사용한 가스 이온원 개발을 수행한 결과 RF 전원 150 W 시 10 kV 급 Ar 이온빔을 약 38 mA/cm<sup>2</sup> 의 전류밀도로 인출할 수 있었다.

이온빔 에너지 FWHM 은 인출 에너지 대비 약 1.7 %이며 인출 전압이 4 kV 에서 10 kV 로 증가함에 따라 변화하지 않았다. 이온빔 에너지 퍼짐 특성이 우수한 유도결합형 플라즈마 소스 이온원 개발을 위해 인출 전기장 최적화 및 운전 조건 개선이 요구된다.

유도결합형 플라즈마 소스 이온원을 통한 2x2 다중 개구 집속 이온빔 가공 결과, 이온빔 집속 특성이 우수한 가공 결과를 얻었으며 유도결합형 플라즈마 소스의 다중 집속 이온빔용 이온원 적용 가능성을 확인하였다. 향후 3x3 또는 5x5 다중 개구 이온빔 개발을 위해서는 가스 이온빔의 에너지 분포가 다중 개구 이온빔의 균일도에 미치는 영향에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

### 후 기

본 연구는 지식경제부 주관의 청정제조기반산업원천기술개발사업인 ‘고효율 에너지빔 응용 초미세 부품 제조용 In-line 시스템 개발’ 연구비 지원으로 이루어 졌습니다.

### 참고문헌

1. Choi, Y., Kim, T.-G., Han, J., Min, B.-K., Kim, Y.-J. and Lee, S. J., “Design and Fabrication of Multi-Aperture Plate for Multi-Ion Beam Patterning System,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 49, No. 6, Paper No. 06GE06, 2010.
2. Kim, T.-G., Kim, S., Min, B.-K. and Lee, S. J., “Design and prototyping of multi ion beam system

- for machining micropattern,” Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 329-330, 2009.
3. Jiang, X., Ji, Q., Chang, A. and Leung, K. N., “Mini rf-driven ion sources for focused ion beam systems,” Rev. Sci. Instrum., Vol. 74, No. 4, pp. 2288-2292, 2003.
  4. Hahto, S. K., Hahto, S. T., Ji, Q., Leung, K. N., Wilde, S., Foley, E. L., Grisham, L. R. and Levinton, F. M., “Multicusp ion source with external rf antenna for production of protons,” Rev. Sci. Instrum., Vol. 75, No. 2, pp. 355-359, 2004.
  5. Lee, Y., Gough, R. A., Kunkel, W. B., Leung, K. N., Perkins, L. T., Pickard, D. S., Sun, L., Vujic, J., Williams, M. D. and Wutte, D., “Ion energy spread and current measurements of the rf-driven multicusp ion source,” Rev. Sci. Instrum., Vol. 68, No. 3, pp. 1398-1402, 1997.
  6. Becker, R. and Herrmannsfeldt, W. B., “igun-A program for the simulation of positive ion extraction including magnetic fields,” Rev. Sci. Instr. Vol. 63, No. 4, pp. 2756-2758, 1992.
  7. Lieberman, M. A. and Lichtenberg, A. J., “Principles of Plasma Discharges and Materials Processing,” Wiley-Interscience, 1994.
  8. Volkert, C. A. and Minor A. M., “Introductory article:Focused Ion Beam Microscopy and Micromachining,” MRS Bulletin, Vol. 32, No. 5, pp. 389-399, 2007.