

다개구 이온빔 가공장치용 냉음극 방식의 가스 이온원의 가능성 평가에 관한 연구

A Feasibility Study on the Cold Hollow Cathode Gas Ion Source for Multi-Aperture Focused Ion Beam System

최성창^{1,✉}, 강인철¹, 한재길¹, 김태곤², 민병권²
Sung-Chang Choi^{1,✉}, In-Cheol Kang¹, Jae-Kil Han¹, Tae-Gon Kim² and Byung-Kwon Min²

¹ 송도테크노파크 나노표면기술실 (Nano & Surface Department SongDo TechnoPark)

² 연세대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.)

✉ Corresponding author: scchoi@step.or.kr, Tel: 032-260-0735

Manuscript received: 2010.6.15 / Revised: 2010.12.15 / Accepted: 2010.12.16

The cold hollow cathode gas ion source is under development for multi aperture focused ion beam (FIB) system. In this paper, we describe the cold hollow cathode ion source design and the general ion source performance using Ar gas. The glow discharge characteristics and the ion beam current density at various operation conditions are investigated. This ion source can generate maximum ion beam current density of approximately 120 mA/cm² at ion beam potential of 10 kV. In order to effectively transport the energetic ions generated from the ion source to the multi-aperture focused ion beam(FIB) system, the einzel lens system for ion beam focusing is designed and evaluated. The ions ejected from the ion source can be forced to move near parallel to the beam axis by adjusting the potentials of the einzel lenses.

Key Words: Ion Beam (이온빔), Plasma (플라즈마), Gas Ion Source (가스이온원), Nano-Fabrication (나노가공), Cold Hollow Cathode (냉음극)

기호설명

J_i = Ion beam current density

σ_i = ionization cross section

n_o = plasma density

k = Boltzmann constant

T_e = Plasma electron temperature

m_i = mass of ion

e = electron charge

ϵ_0 = vacuum permittivity

A = extraction aperture area

V_i = ion beam potential (extraction voltage)

V_f = focusing potential

d = electrode gap [m]

P_w = Working pressure

1. 서론

나노사이즈의 정밀 가공 기술에 있어 광학적인 Photo lithography 기술들은 지난 수십년간 반도체 제조 공정에 이용되어 왔다. 그러나, 최근 선풍이 급격히 감소하고 있어 기존의 광학적 방법으로는 한계에 도달하였으며 이를 해결하기 위하여 extreme UV(EUV) 또는 X-ray 를 광원으로 사용하는

기술들이 등장하였으며 X-ray lithography 기술을 이용할 경우 Si 기판에 17 nm 크기의 패터닝을 구현할 수 있음이 보고되었다.¹ 그러나 이러한 X-ray lithography 기술을 이용하기 위하여서는 마스크를 제작하여야 하는데 이러한 마스크 제작은 전자빔 이용하여 제작한다. 한편 10 nm 이하의 정밀 가공에는 주로 전자빔과 이온빔이 사용되는데, 전자빔의 경우 5 nm 선폭을 가지는 선을 가공할 수 있음을 보여주었으나 전자빔의 경우 기판을 직접 가공하는 것이 아니라, polymethyl-methacrylate(PMMA)와 같은 전자빔용 resist 필름에 전자빔을 조사한 후 후속 공정을 통하여 패터닝을 진행하기 때문에 실제로 다양한 문제로 인하여 10nm 이하의 패턴을 재현성 있게 제조하는 것은 매우 어렵다.²

한편 정밀 패터닝 분야에서는 주로 LMIS (Liquid Metal Ion Source)를 이용하는 Focused Ion Beam(FIB)이 사용되는데 FIB의 경우 resist를 이용하지 않고 기판을 직접 가공하기 때문에 재현성이 매우 높으며 10 nm의 패터닝이 가능함을 보여 주었다.² 기존의 FIB의 경우 라인 단위로 작업을 하기 때문에 패터닝에 많은 시간이 소요되어 최근 이러한 단점을 극복하고자 다개구를 이용하는 다중빔 방식의 이온빔 가공 장비나,³ Ion projection lithography(IPL)⁴ 기술을 활용한 가공장비가 개발되고 있다. Fig. 1은 가스 이온원을 이용한 다중빔 방식의 이온빔 가공 장치의 개략도로 Fig. 1에서 보듯이 이온원으로부터 방출된 이온빔을 다개구를 이용하여 여러 개의 다중빔으로 분리한 후 다시 집속하여 가공하는 시스템으로 다개구 패턴이 형성되어 있는 영역(수 mm x 수 mm)에 이온빔이 균일하게 조사되어야 한다. 기존에 FIB에서 사용되어 왔던 LMIS는 다개구가 형성되어 있는 영역을 균일하게 이온빔을 조사하기 어렵기 때문에 본 시스템에 적합하지 않으며, 다개구 패턴이 있는 영역을 균일한 이온빔 밀도로 조사할 수 있는 Gas 이온원이 보다 적합하며 주로 RF 방식의 multi-cusp ion source,⁵ gas field ion source(GFIS),⁶ Penning type ion source⁷ 등이 주로 연구되고 있다.

한편 DC 전원을 사용하는 cold hollow cathode ion source의 경우 대면적 이온원으로 주로 사용되어 왔고,⁸ 대면적에서도 10 mA/cm²의 높은 전류 밀도를 보여주어 인출 전극 구조를 변경할 경우 고밀도 이온원으로서 가능성이 높으며,⁹ RF 방식에 비해 장비 가격이 저렴한 장점이 있다. 본 연구에서는 cold hollow cathode ion source가 다개구 방식

의 이온빔 가공 시스템의 가스 이온원으로서 가능성을 평가하고자 연구를 진행하였다.

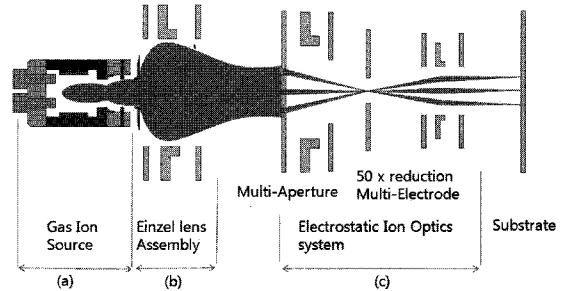


Fig. 1 Schematic diagram of multi-aperture focused ion beam system

2. 이온소스 제작

Cold hollow cathode 이온원은 고압의 DC 전원을 인가하여 glow-discharge(GD)에 의한 플라즈마를 발생시키고 발생한 플라즈마로부터 이온을 인출해 내는 방식이다. Cold hollow cathode 이온원은 대표적으로 마그네트론(Magnetron) 방식과 플라즈마트론(Plasmatron) 방식이 널리 사용되며 주로 대면적 표면처리용으로 사용되어지기 때문에 anode cavity 출구에 그리드(grid) 형태의 인출 전극 시스템을 가진다.⁸ 플라즈마트론 방식의 경우 cold hollow cathode cavity{Fig. 2(a)}와 igniting electrode {Fig. 2(c)}사이에서 고압을 인가하여 GD 방전을 발생시키고 발생한 플라즈마로부터 전자를 electron extractor{Fig. 2(f)}를 통하여 anode cavity{Fig. 2(b)} 쪽으로 보내주고 anode cavity로 이동된 전자가 anode cavity에서 가스와 충돌하여 플라즈마를 발생시키며, anode cavity에서 발생한 플라즈마로부터 최종적으로 이온을 인출한다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 Plasmatron 이온원 시스템의 개략도로 플라즈마 밀도를 향상시키기 위하여 anode cavity 주위에는 비교적 약한 영구자석{Fig. 2(d)}을 cathode cavity 주위에는 비교적 강한 영구자석{Fig. 2(e)}을 설치하여 주는데 설치된 자석은 전자의 경로를 헬리컬 모션으로 바꾸어 전자의 이동 경로를 증가시켜 가스와의 충돌 확률을 높여서 이온빔의 전류 밀도를 향상시킨다. 한편, 본 연구에서 사용된 이온원은 대면적 표면 처리용이 아니라 정밀 이온빔 가공용 이온원이기 때문에 이온 인출 전극의 개구{Fig. 2. (g)}를 직경 2mm로 제작하였다. 이온 인출

개구의 크기가 커지면 이온빔의 전체 전류 세기는 증가하나, 이온빔 밀도가 증가하는 것은 아니며, 또한 einzel lens 를 사용하여 빔을 집속할 경우에도 인출 개구 크기 이하로 줄이기 어렵기 때문에 다개구가 형성된 영역의 크기와 동일한 크기로 제작하였다. 이온원으로부터 2mm 개구를 통하여 방출되는 이온의 양을 측정하기 위하여 개구로부터 20 mm 상단에 Faraday cup 을 설치하였으며 Faraday cup 은 -27V 전압을 인가하여 이차 전자에 의한 전류를 방지하였다.

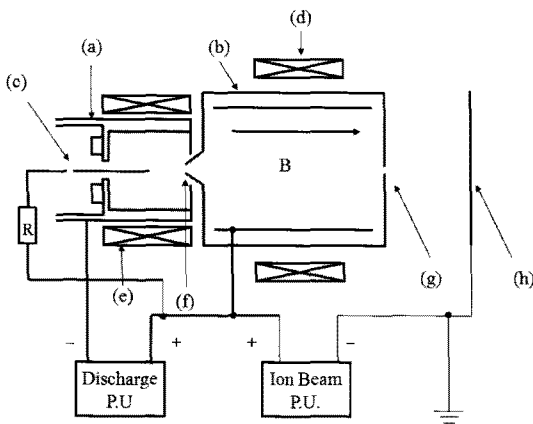


Fig. 2 Schematic diagram of plasmatron electrode structure ion source and power supply system. (a) cold hollow cathode, (b) anode, (c) igniting electrode, (d,e) permanent magnet, (f) electron extractor, (g) ion extraction aperture, (h) Faraday cup

3. 이온소스의 특성

이온소스로부터 방출되는 전류밀도 J_i 는 아래와 같은 식으로 표시된다.

$$J_i \propto A \sigma_i n_0 e (kT_e / m_i)^{1/2} \quad (1)$$

즉 인출되는 전류밀도는 플라즈마 밀도에 비례한다. 따라서 높은 전류밀도를 얻기 위해서는 플라즈마 밀도를 높여 주어야 한다. 플라즈마 밀도는 방전 전류(I_d)와 비례하기 때문에 I_d 를 높여 주어야 한다. Fig. 3 은 아르곤 가스를 사용할 경우 진공도의 변화에 따른 GD 발생시 I_d 와 방전 전압 (V_d)과의 관계를 보여준다. Fig. 3 에서 보듯이 일정

한 전압(Break down voltage)을 넘으면 I_d 의 양은 V_d 에 거의 선형적으로 비례하여 증가하게 되는데 이는 실제 이온원이 작동하는 영역이 abnormal grow 방전 영역이기 때문이다.¹⁰ 진공도가 낮아질수록 동일한 I_d 를 얻기 위하여 높은 V_d 가 필요하다. 챔버 진공도가 1×10^{-5} Torr 영역에서는 I_d 가 1000 mA 이상 되기 위해서는 V_d 가 800V 이상 인가되어야 하나, 본 연구에 사용된 방전용 전원 공급장치가 5kW(800V, 6.3A) 급으로 800V 이상 전압인가가 불가능하여 더 높은 전류 밀도를 얻을 수 없었다. 진공도가 1×10^{-5} Torr 영역보다 낮아지면 GD 는 지속되지 못하고 사라지는 현상을 보여주었다. 진공도가 높아질 경우 보다 낮은 V_d 에서는 높은 I_d 를 얻을 수 있었으나 진공도가 너무 높아질 경우 방전 모드가 GD 에서 arc 방전으로 바뀌는 현상이 관찰 되었다. Arc 방전이 발생할 경우 I_d 는 크게 증가하나 이온원 작동을 위해 이온 인출 전극에 고압을 인가할 경우 인출 전류가 전원공급장치의 한계를 넘어가기 때문에 실제 고압 인가가 불가능하게 되어 실제 이온 소스의 역할을 할 수 없게 된다. 일반적으로 인출 전압(V_i)의 변화에 대한 인출전류는 Child-Langmuir equation 을 따르며 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$J_i = (4 \epsilon_0 / 9) (2q / m_i)^{1/2} V_i^{3/2} / d^2 \quad (2)$$

Fig. 4 는 I_d 와 V_i 의 변화에 따른 이온빔 전류 밀도의 변화를 보여주는데, 낮은 에너지 영역에서는 선형적으로 변하다가 7 kV 이후에 포화되는 현상을 보여준다. 인출되는 이온빔 전류밀도는 식 (2)에 의하면 V_i 의 3/2 제곱에 비례하여야 하나, 실제로는 거의 선형적인 증가를 보여준다. 이러한 이유는 Fig. 2 에서 보면 방전 파워를 보호하기 위한 브리드 저항(R:200 Ω)이 이온빔 포텐셜 파워 유닛과 방전 파워 유닛이 공통으로 연결된 부분과 igniting electrode 의 중간에 연결되어 있는데 이로 인하여 다양한 조건의 변화에 따라 저항에 의한 전압 강하의 정도가 다르기 때문에 electron extractor 를 통하여 빠져나가는 빠른 전자의 양에 영향을 미치기 때문으로 판단되며, 다른 이유로는 anode cavity 의 복잡한 전압인가 구조로 때문으로 판단되며 이에 대하여서는 좀 더 체계적인 연구가 필요하다. 전류밀도는 진공도(P_w)에도 영향을 받는데 실제로 P_w 가 낮을수록 높은 전류 밀도를

얻을 수 있는데 Fig. 3 에서 보듯이 P_w 가 낮을수록 동일한 I_d 를 얻기 위하여 더 높은 V_d 가 인가되어야 하는데 V_d 는 cathode cavity 에서 플라즈마를 발생시키기 위한 포텐셜이지만 실제로는 cathode cavity 에서 발생된 플라즈마에서 전자를 인출하여 anode cavity 로 이동시켜주는 포텐셜 에너지로 작동하기 때문에, V_d 가 높을수록 더 많은 빠른 전자가 anode cavity 쪽으로 이동하기 때문에 anode cavity 에서 플라즈마 밀도를 상승시켜 인출되는 이온빔 전류 밀도를 상승시킨다. 본 연구에서 획득한 최고 전류밀도는 $P_w = 2 \times 10^{-5}$ Torr, $I_d = 3000$ mA, $V_i = 10$ kV 일 때 120 mA/cm^2 로 통상적으로 다중빔 방식의 이온 가공장비의 이온원으로 사용하고자 하는 RF 이온원의 경우 가속전압이 10 kV 내외인 경우 전류밀도가 $30 \sim 200 \text{ mA/cm}^2$ 정도로 보고 되고 있어^{5,11,12} 다중빔 방식의 이온 가공장비의 이온원으로 가능성을 확인할 수 있었다.

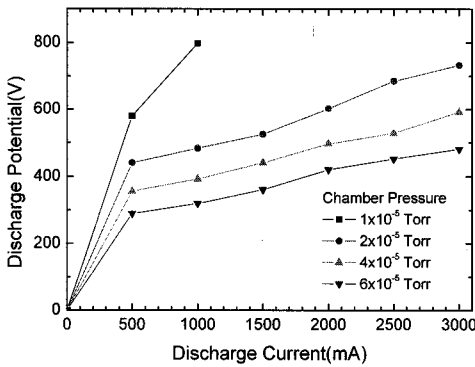


Fig. 3 Changes of discharge potentials as a function of ion beam potential at various vacuum conditions

4. 이온빔 포커싱 특성

다중빔 방식의 이온 가공장비에 이온원으로서는 가스 이온원을 사용하기 위하여서는 방출되는 이온빔을 퍼지지 않도록 하여 평행한 형태로 다개구를 포함하는 정전형 이온광학 시스템{Fig. 1(c)}의 입구로 입사시켜 주어야 한다. 다개구를 포함하는 정전형 이온광학 시스템의 입구의 크기는 2mm이며, 바로 아래 이온빔을 분할하기 위한 다개구가 설치되어 있으며, 개구당 직경은 $50 \mu\text{m}$ 이며 개구간의 간격은 $200 \mu\text{m}$ 정도로 3×3 의 다개구를 구성할 경우 다개구 영역은 $450 \mu\text{m} \times 450 \mu\text{m}$ 이고 5×5 인 경우 $850 \mu\text{m} \times 850 \mu\text{m}$ 로 직경 1.2 mm 정도에 균일한 이온빔이 입사되어야 한다. 실제로 이온원으로부터 방출된 이온빔은 이온원 내부의 플라즈마 밀도에 의하여 이온빔 인출 개구 부분에서 형성되는 meniscus 의 형태에 따라 방출되는 모양이 다르지만 대부분의 경우 방사형으로 방출된다. 이렇게 방사형으로 방출되는 이온빔을 모아서 평행한 형태로 다개구 정전형 이온광학 시스템의 입구로 전달하기 위하여 einzel lens assembly 를 Fig. 5(a)에 보는 것과 같이 Simion code 를 통한 전사 모사를 통하여 검증하고 이를 바탕으로 설계 제작하여 설치하였다. Fig. 5(b)는 실제 이온원의 작동 모습이다. Fig. 5(b)에 보듯이 집속된 이온빔의 크기는 인출되는 이온빔에 개구의 크기와 거의 유사함을 알 수 있다.

이러한 이온빔 집속 효과를 검증하기 위하여 einzel lens assembly 의 가장 우측에 위치한 마지막 접지 전극에서 40mm 떨어진 곳에 직경 1mm 의 개구를 가지는 Faraday cup 을 마이크로 메타가 장착된 x-y-z 스테이지에 연결하여 설치하고 x 축 방향으로 이동하면서 이온빔에 의한 전류의 변화를 측정하였다. Fig. 6 은 $P_w = 2 \times 10^{-5}$ Torr, $I_d = 2000$ mA, $V_i = 7$ kV 조건에서 각각의 집속 전위(V_f)에 대하여 x 축 방향으로 이동하면서 측정한 이온빔 전류밀도의 프로파일이다. Fig. 6 에서 보면 V_f 가 증가하게 되면 중심 지점뿐만 아니라, 전체적으로 전류밀도도 증가하며, 전류밀도가 균일한 영역도 넓어진다. V_f 를 계속 증가시켜 V_f 가 6.9 kV 에 도달하면 중심부에서 전류밀도는 최대가 되며 더욱 증가시킬 경우 중심부에서 이온빔 전류밀도는 감소하기 시작하지만 전류밀도가 균일한 영역은 증가하게 된다. 최대전류 밀도를 얻을 수 있는 조건인 $V_f = 6.9$ kV 조건에서 약 95%의 균일도를 보여주는

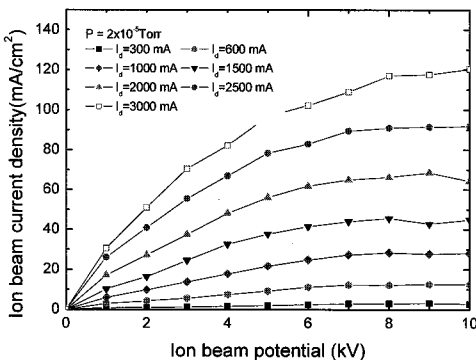


Fig. 4 Changes of ion beam current densities as a function of ion beam potential at various discharge current conditions

영역의 크기는 직경 0.8 mm 의 원형 영역이며, 반면 $V_f = 6.95$ kV 인 조건에서는 중심점에서 최대전류밀도는 약 30% 가량 감소하지만 95%의 균일도를 보여주는 영역의 크기는 대략 직경 1.8 mm 의 원형 영역이었다. V_f 를 조금 더 증가시킬 경우 이온빔 밀도는 급격히 감소하게 되는데 이는 집속 전극에 인가된 포텐셜이 이온빔에 대하여 배리어 역할을 하기 때문에 이온원 내부에서 발생된 이온들은 집속 포텐셜을 극복하지 못하고 집속 전극에 의하여 후방으로 반사되기 때문이다. 앞에 언급한 것처럼 einzel lens assembly 의 주 목적이 발산되는 이온빔을 모아서 효과적으로 다개구를 포함하는 정전형 이온광학 시스템에 전달하는 것으로 다개구의 입구 부분으로 가능하면 균일하고 평행한 이온빔을 보내주는 것이다. 이러한 관점에서 볼 때 V_f 는 중심에서 최대 이온빔 전류 밀도를 갖도록

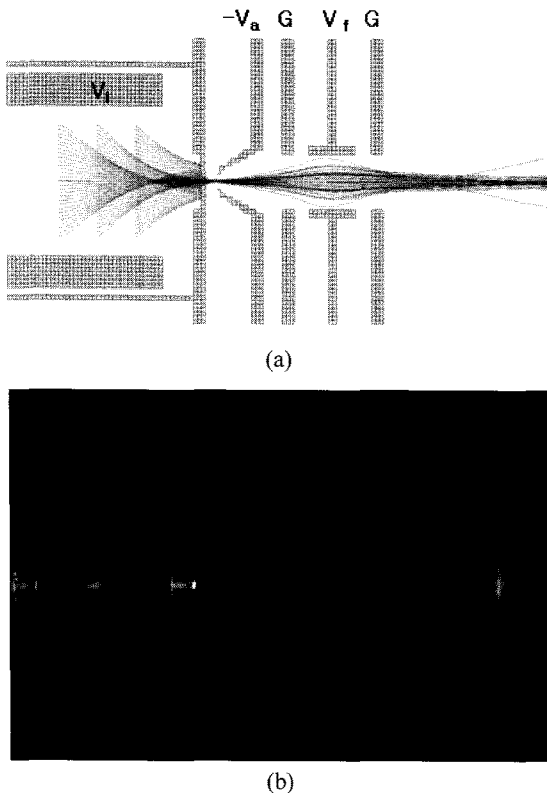


Fig. 5 (a) The computer simulation result of ion beam focusing system and (b) the image of ion beam trajectory at $P_w = 2 \times 10^{-5}$ Torr, $I_d = 2000$ mA, $V_i = 7$ kV and $V_f = 6.9$ kV

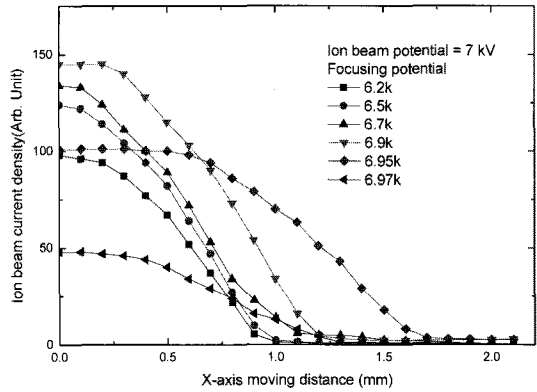


Fig. 6 Changes of ion beam moving current densities depending on the moving distance along the x-axis with various focusing potentials

조절하기 보다는 V_f 를 중심에서 최대 이온빔 전류 밀도를 보이는 값보다 약간 증가시켜 비교적 높은 이온빔 전류 밀도를 보이면서, 균일하게 이온빔이 조사되는 범위가 넓어지도록 조건으로 설정하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

5. 결론

다중빔 방식의 이온 가공장비의 가스 이온원으로 사용하기 위하여 plasmatron 방식의 cold hollow cathode 이온원을 개발하였다. 개발된 이온원은 10 kV 까지 가속이 가능하였으며 직경 2 mm 크기의 이온빔 인출 개구를 통하여 최대 120 mA/cm^2 의 이온빔 전류 밀도를 얻을 수 있어 기존에 가스 이온원으로서 주목 받고 있는 rf 이온원과 유사한 성능을 보여주었다. 인출된 이온빔을 다개구 이온광학 렌즈 시스템에 효과적으로 전달하기 위하여 einzel lens assembly 를 제작 평가한 결과, 집속 전위를 증가시킴에 따라 중심지점에서 이온빔 밀도가 증가하다가 최고 값에 도달한 후 급격히 감소하는 경향이 관찰되었으며, 이온빔이 균일하게 조사되는 면적은 중심에서 이온빔 밀도가 최대가 되는 집속 전위보다 조금 높은 전위가 인가되었을 때 최대가 되었으며 95%의 균일도를 나타내는 영역의 크기는 대략 직경 1.8 mm 이었다. 이상의 결과를 통하여 제작된 plasmatron 방식의 cold hollow cathode 이온원을 다중빔 방식의 이온 가공 장비의 이온원으로 사용 가능함을 확인할 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

- Okazaki, S., "Comparison of Optical, X-ray, Electron, and ion beam Lithography," *Microelectronics Engineering*, Vol. 9, No. 1-4, pp. 297-304, 1989.
- Gierak, J., Maily, D., Faini, G., Pelouard, J. L., Denk, P., Pardo, F., Marzin, J. Y., Septier, A., Schmid, G., Ferre, J., hydamn, R., Chappert, C., Flicstein, J., Gayral, B. and Gerard, J. M., "Nano-fabrication with focused ion beams," *Microelectronic Engineering*, Vol. 57-58, pp. 865-875, 2001.
- Choi, Y. S., Kim, T. G., Min, B. K. and Kim, Y. J., "Evaluation of durability and etching rate of material of the Multi-aperture plate for Multi-FIB," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 929-930, 2009.
- Bruenger, W. H., Kaesmaier, R., Loeshner, H. and Springer, R., "Status of Ion Projection Lithography," *Proc. of Mat. Res. Soc. Symp.*, Vol. 636, Paper No. D5.5, 2001.
- Jiang, X. Q., Chang, J. 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.
- Salancon, E., Hammadi, Z. and Morin, R., "A new approach to gas field ion sources," *Ultramicroscopy*, Vol. 95, No. 1-4, pp. 183-188, 2003.
- Guharay, S. K., Sokolovsky, E. A., Reiser, M., Orloff, J. and Melngailis, J., "Study of energy broadening of high-brightness ion beams from a surface plasma Penning source and its relevance in ion projection lithography," *Microelectronic Engineering*, Vol. 35, No. 1-4, pp. 435-438, 1997.
- Choi, S. C. and Han J. K., "Surface Modification of polymer and Metal by Ion Beam or Plasma," *J. Kor. Soc. Prec. Eng.*, Vol. 25, No. 3, pp. 32-43, 2008.
- Gavrilov, N. V., Mesyats, G. A., Radkovski, G. V. and Bersenev, V. V., "Development of technological sources of gas ions on the basis of hollow-cathode glow discharge," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 96, No. 1, pp. 81-88, 1997.
- Remy, J., Biennier, L. and Salama, F., "Plasma structure in a pulsed discharge environment," *Plasma Source Sci. Technol.*, Vol. 12, No. 3, pp. 295-301, 2003.
- Boonyawan, D., Suanpoot, P. and Vilaithong, T., "A 13.56 MHz multicusp ion source for gaseous ion-beam production," *Surface and Coating Technology*, Vol. 112, No. 1-3, pp. 314-317, 1999.
- Wutte, D., Freedman, S., Gough, R., Lee, Y., Leitner, M., Leung, K. N., Lyneis, C., Pickard, D. S., Williams, M. D. and Xie, Z. Q., "Development of an rf driven multicusp ion source for nuclear science experiments," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Vol. 142, No. 3, pp. 409-416, 1998.