

마이크로 사이즈 인출구경을 이용한 고휘도 이온빔 인출 시스템 개발

김윤재*, 박동희, 정형설, 황용석

Development of a High Brightness Ion Beam Extraction System using Micro-size Aperture

Yoon-Jae Kim*, Dong-Hee Park, Hyeong-Seol Jeong, Yong-Seok Hwang

Abstract

In order to develop a high brightness ion source using plasma, the ion beam extraction system with an aperture of 100 μ m in diameter has been designed and constructed. It is observed that over 500nA of He ion beam current can be extracted. With such an optimized condition, $\sim 10^3$ A/cm²sr beam brightness can be measured by emittance scanner, which is believed to be a promising result for developing next generation FIB.

Key Words : Plasma ion source, Focused ion beam, Brightness, Virtual source

1. 서론

집속이온빔(Focused ion beam, FIB) 기술은 1970년대 후반부터 개발이 시작되어서 1990년대부터는 여러 장비 업체에서 상용 장비로 판매하기 시작하여, Photomask 수정, 국부적인 직접 에칭 및 CVD, Micro-machining 공정, TEM 시편 제작, Maskless 이온주입 및 리소그래피 공정 등 반도체공정 및 미세가공 분야에서 필수적인 장비로 활용되어왔다[1]. 특히 최근에는 나노미터급의 초미세 3차원 형상을 가공하는 분야에 FIB의 도입이 적극적으로 이루어지고 있다. FIB 장비를 개발함에 있어서 가장 중요한 기술 중에 하나는 고휘도 이온원의 개발이다. 이온빔을 최종적으로 수십 nm급으로 집속시키기 위해서는 정전렌즈

의 집속 성능이 매우 중요한데, 이러한 렌즈의 집속 성능은 정전렌즈의 정밀 설계/제작 기술과 더불어, 입사되는 이온빔의 품질에 의해 결정된다. 이 중 입사되는 이온빔의 품질은 정전렌즈 앞단에 위치한 이온원의 휘도(Brightness)와 관계가 있는데, 이온빔의 휘도는 다음과 같이 정의된다.

$$B = \frac{4I\Omega}{\pi d_v^2} = \frac{4I}{(\pi d_v^2)\Omega} = \frac{I}{\epsilon_x \epsilon_y} \quad (1)$$

여기서, I 는 이온빔 전류, d_v 는 virtual source diameter, Ω 는 이온빔의 발산입체각, ϵ 는 에미턴스이다. 위 식에서 알 수 있듯이, 인출되는 이온빔의 angular intensity($I\Omega$)

* 주저자, 서울대학교 원자핵공학과 (kyj0202@snu.ac.kr)
주소: 151-742 서울시 관악구 신림동 산56-1

가 클수록, 또한 이온빔이 방출되는 가상 면인 virtual source size가 작을수록 고휘도가 달성되며, 이러한 특징을 갖는 이온원이 FIB 장비에 적합한 이온원이라 할 수 있다.

지금까지 상용 FIB장비에서 사용된 이온원은 대부분 액체 금속이온원(Liquid Metal Ion Source, LMIS)이었는데, 이는 LMIS가 수십nm 정도로 매우 작은 virtual source diameter 특성(apex tip의 곡률반경과 관련됨)을 가지고 있고, 그에 따른 고휘도 특성이 FIB 장비 개발 및 이온빔 집속능 향상에 유리하게 작용할 수 있었기 때문이다. Table 1에서 지금까지 개발된 여러 가지 이온원들의 휘도관련 특성 변수들을 나타내었다[2,3]. Table 1에서 보면 전계방출 효과를 이용하는 LMIS, GFIS(Gas field ion source) 등이 플라즈마를 이용하는 이온원에 비해서 높은 휘도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 전계효과를 이용하는 이온원의 경우 Angular intensity가 낮고, LMIS는 높은 에너지 편차, 그리고 GFIS의 경우에는 Cryogenic system의 불가피성 등이 단점으로 지적되고 있다[3]. 그러나 무엇보다 LMIS 및 GFIS의 경우에는 사용할 수 있는 이온종(Ion species)에 제한이 있다는 점, 그리고 point source라는 특성으로 인해 다중이온빔시스템(Multi ion beam system)으로의 적용이 힘들다는 점이 가장 큰 난제라고 할 수 있다. 이러한 전계방출이온원의 한계를 극복하고, 신개념의 고휘도 이온원을 개발한다면, 궁극적으로는 획기적으로 향상된 수율을 갖는 차세대 집속이온빔 시스템을 개발하는 것이 가능할 것이다. 이를 위해 전류밀도 특성이 뛰어난 플라즈마 이온원을 개선하여 LMIS의 고휘도 특성에 근접할 수 있는 신개념의 플라즈마 이온원을 개발하는 것이 본 논문의 내용이다.

Table 1 여러 가지 이온원의 휘도 특성

	Virtual source [nm]	Angular intensity [$\mu\text{A}/\text{sr}$]	Energy spread [eV]	Brightness [$\text{A}/\text{cm}^2\text{sr}$]
LMIS	50	20	10	10^6
GFIS	1	0.1	1	10^7
Duoplasmatron	5×10^4	3×10^3	5	10^2
Penning Ion Source	1×10^4	5×10^3	5	10^3

2. 실험 방법 및 장치 구성

2.1 플라즈마 이온원의 휘도특성 및 개선

Table 1에서 볼 수 있듯이, 플라즈마를 이용하는 이온원의 전류밀도 또는 Angular intensity 특성은 전계방출이온원에 비해서 우수하다고 알려져 있다. 그러나 전계방출이온원이 날카롭게 가공된 Apex에서 이온빔을 방출하는 것과 달리, 플라즈마 이온원에서는 플라즈마와 접촉하는 플라즈마전극(Plasma electrode)에 가공되는 인출구경(Extraction aperture)를 통해 방출된다. 플라즈마 이온원에서 통상적으로 사용되었던 인출구경의 직경은 대략 수mm~수cm로서 이는 발생된 플라즈마의 sheath width보다 매우 큰 사이즈였다. 그러나 플라즈마 이온원이 고휘도를 달성하기 위해서는 낮은 에미턴스 특성을 가져야 한다. 여기서 에미턴스는 빔의 반경과 횡방향 속도성분에 의해 이온빔이 퍼지는 각을 곱한 측정치이며, 위상공간 면적에 비례하는 양이다. 엄밀히 정의하면 beam emittance는 6차원 위상 공간에서 beam 입자들이 차지하는 pattern과 관계가 있다. 에미턴스는 다음과 같이 이론적으로 계산된다[4].

$$\epsilon = 6.5 \times 10^{-2} r_0 \sqrt{\text{of} \frac{T_i}{A}} \quad (2)$$

여기서 r_0 는 인출구경의 반경, T_i 는 이온온도, A 는 이온종의 mass이다. 위 식에서 알 수 있듯이, 낮은 에미턴스를 위해서는 인출구경의 크기가 작아져야 한다. 플라즈마 이온원이 전계방출이온원과 같은 수준의 저에미턴스 또는 매우 작은 virtual source size를 갖기 위해서는 인출구경의 크기를 수 마이크로미터 수준까지 줄여야 한다.

2.2 실험장치

Fig.1에서 본 연구에서 개발된 플라즈마 이온빔 인출시스템을 나타내고 있다. 이온빔 인출을 위한 플라즈마원으로는 13.56MHz의 고주파를 사용하는 유도결합 플라즈마원을 채택하였다. 유도결합 플라즈마는 안테나에서 발생하는 유도자기장이 진공챔버내에 원주방향의 유도 전기장을 발생하고 이러한 유도 전기장으로 전자를 가속시켜 플라즈마를 발생 및 유지시키는 것이 그 특징이다. 고주파와 플라즈마의 유도결합을 통해 발생하는 유도결합 플라즈마원은 10^{11}cm^{-3} 이상의 고밀도 플라즈마를 얻을 수 있는 효율적인 플라즈마 발생방법으로 알려져 있으며, 플라즈마 전위가 기존의 축전결

합 플라즈마에 비해 낮다는 장점을 가지고 있다. 이를 통해 이온 온도 및 이온에너지 분산을 감소시킬 수 있어 높은 휘도를 달성하는데 큰 역할을 할 수 있다고 판단된다.

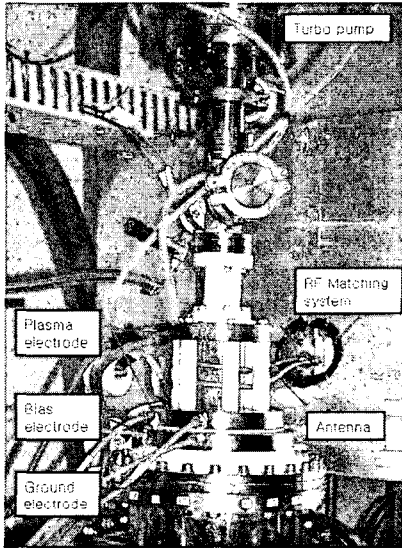


Fig. 1. 플라즈마 이온빔 인출시스템

바이어스 전극과 접지전극의 경우 각각 직경 0.1mm, 1mm의 마이크로 홀을 이용하여 인출시스템을 구성하기 때문에 제작 및 정렬에 어려움이 예상됨에 따라 착탈이 가능한 모듈의 형태로 제작하였다. 먼저 외경 30mm, 두께 0.25mm의 탄탈륨 판에 직경 0.1mm의 인출 홀을 방전드릴(슈퍼드릴) 방법을 이용하여 가공한 후 이를 외경 50mm, 내경 30mm 스테인리스 판에 레이저 용접을 이용하여 고정하였다. 그리고 이 모듈을 내경 14mm, 외경 176mm, 두께 20mm의 스테인리스 판에 고정하였다. 바이어스 전극위에 절연을 위하여 세라믹 판을 사이에 두고 접지전극을 조립하였으며 현미경을 통하여 바이어스 전극에 위치하고 있는 직경 0.1mm의 마이크로 홀과 접지전극에 위치하고 있는 1mm의 홀의 중심점이 일치하도록 정렬하였다. 접지전극의 경우 진공배기를 위하여 중심 홀주위에 진공배기구를 가공하였으며 구리선을 이용하여 진공 챔버에 접지하였다.

Virtual source diameter를 줄이기 위해 본 이온원에서 Aperture 사이즈를 100 μ m로 제한하였다. 따라서 터보분자펌프 1대에 의한 차등진공이 불가능하다고 판단하여 플

라즈마 발생부와 인출부를 각각 고진공 상태로 유지하기 위하여 독립적인 진공시스템을 구성하였다. 플라즈마 발생부와 인출부는 각각의 터보펌프를 이용하여 진공을 유지시켰고 플라즈마 발생부에는 MFC(Mass Flow Controller)를 이용하여 방전에 필요한 가스를 주입하였다. 특히, 높은 압력의 ICP 운전일 수록 빔 에너지 분산 및 전자온도 감소에 좋은 면이 있으므로, 분리된 진공시스템에 의한 높은 차등진공도는 고휘도 이온원으로서 매우 큰 장점이 될 수 있다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 압력에 따른 이온빔의 인출특성

위에서 언급하였듯이, 본 이온원은 100 μ m aperture를 경계로 플라즈마 발생부와 인출영역이 매우 다른 압력조건에 운전이 가능하다. 따라서 높은 압력에서 발생한 저온 플라즈마를 이온빔 인출에 사용할 수 있다. 플라즈마 영역의 운전 압력에 따라서 이온빔을 인출한 결과를 Fig.2에서 나타내고 있다. 통상적으로 Driving frequency보다 전자-중성종 간 충돌 frequency가 높은 경우, 압력이 높을수록 높은 플라즈마 밀도 및 낮은 전자온도를 나타내는 것으로 알려져 있다. 따라서 높은 플라즈마 밀도는 더 높은 이온빔 전류를 인출하는 조건이 된다. Fig.2은 이러한 경향을 실험적으로 나타내고 있다. 그러나 70mTorr 이상의 압력에서는 플라즈마영역 펌핑용 터보펌프(고전압으로 Floating)와 챔버GND간의 Glow discharge가 형성되었다. 따라서 운전압력은 50mTorr로 고정하여 실험을 진행하였다.

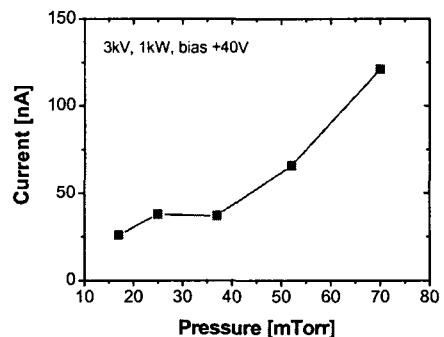


Fig. 2. 압력에 따른 이온빔 인출

3.2 고전압 인출특성

음전압의 바이어스에서는 Fig.3에서 보듯이 적정 인출전압이 존재하며 그 이상의 고전압이 걸릴 때는 이온빔 전류가 포화 또는 감소하는 것을 알 수 있다. 반면, 양전압 바이어스를 걸고, 고전압 인출을 하면 이온빔이 계속적으로 증가하며, 포화 또는 감소하지 않음을 알 수 있다. 이는 양전압 바이어스를 통해 향상된 플라즈마 수송효과가 적정 인출전압을 높인 것으로 판단된다. 따라서 휘도개선을 위해서는 이러한 영역의 운전모드를 선택해야 함을 알 수 있었다.

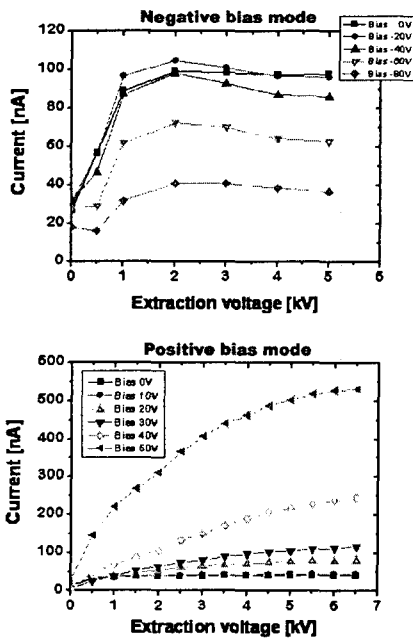


Fig. 3. 인출전압에 따른 이온빔 전류 변화

3.3 이온빔의 발산각 및 휘도

편향전극 및 패러데이컵을 이용하여 이온빔의 발산각을 측정하였고, 이를 통해 방출된 이온빔의 휘도특성을 연구하였다. Fig.4에서는 양전압 바이어스를 걸고, 인출 고전압을 높여가며 이온빔의 빔 발산각을 측정한 결과를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 인출전압이 증가할수록 빔 전류는 증가하고, 빔 발산각은 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 이온빔의 휘도가 증가하는 경향이라고 판단할 수 있으며, 증가 또는 감소의 경향성이 6kV 이상에서는 포화할 것으로 보인다. 또한 플라즈마 밀도가 증가할수록 더 높은 인출전압

에서 포화할 것으로 추정된다. 빔 발산각은 최소 27mrad까지 감소함을 알 수 있었다.

Fig.5에서는 인출전압 5kV로 고정된 후, 양전압 바이어스에 따라 이온빔의 휘도 및 발산각을 측정한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 빔의 발산각은 10~20V에서 최대가 된 후 양전압이 높아짐에 따라서 30mrad 이하로 낮아짐을 알 수 있었다. 또한 양전압이 높아짐에 따라 전류밀도가 급격히 높아져서, 결과적으로 이온빔의 휘도가 급격히 증가하였다. 양전압 바이어스가 50V이고 Virtual source diameter를 $6\mu\text{m}$ 으로 가정하여 계산한 결과, 이온빔의 휘도는 $10^3 \text{ A/cm}^2\text{sr}$ 이상이 됨을 확인하였다.

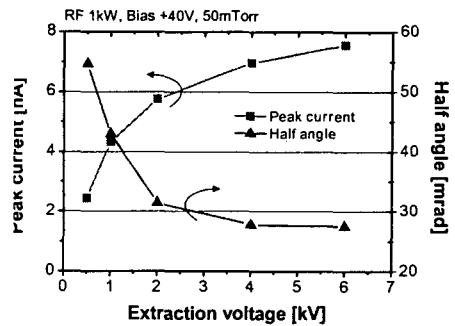


Fig. 4. 이온빔의 peak current와 발산각

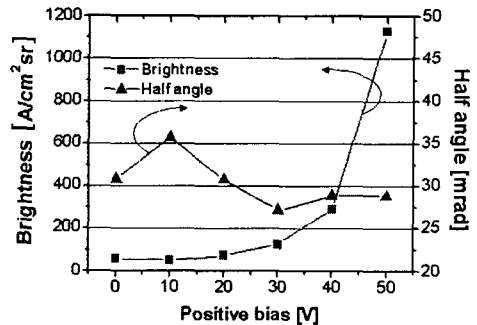


Fig. 5. 이온빔의 휘도 특성

4. 결론 및 기대효과

마이크로 사이즈의 인출구경을 이용하여 플라즈마 이온원의 휘도특성을 개선하였고 전류 및 휘도특성에 대한 실험을 수행하였다. 인출전압을 변경하면서 이온빔 전류를 측정한 결과, 최대 550nA의 이온빔 전류특성을 보였으며, 이러한

최적의 조건에서 측정된 이온원의 휘도는 $10^3 \text{ A/cm}^2\text{sr}$ 를 상회하였다.

밀도특성이 월등히 뛰어난 아르곤 플라즈마와 $10\mu\text{m}$ 의 인출경을 사용하고, 본 연구에서 제안된 바이어스 인출기법 및 고출력 RF 플라즈마를 이용한다면 LMIS에 필적할 수 있는 $10^5 \text{ A/cm}^2\text{sr}$ 이상의 휘도가 충분히 달성될 것으로 추정되었다. 또한 플라즈마밀도를 통해 추정된 전류밀도 증가폭은 국외 연구기관에서 제시한 수치보다 월등히 높다. 이는 공정수율 향상에 절대적인 장점을 가질 수 있어서 향후 나노기술 발전에 핵심적인 tool이 될 차세대 집속이온빔 장비의 미래는 밝다고 할 수 있다. 본 연구를 통해서 추정된 이온원의 성능을 국외 관련 연구그룹의 이온원과 비교분석한 자료가 Fig.6에서 나타내고 있다.

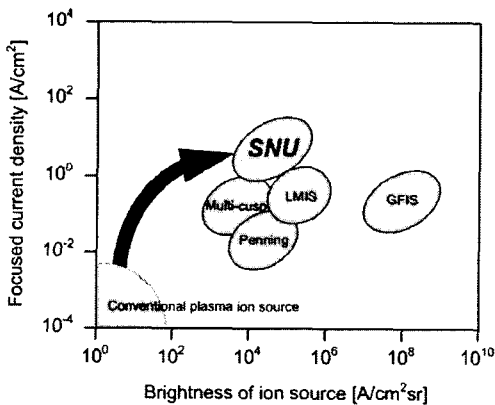
또한 본 연구에서 적용된 것과 같이 체적(volumetric)으로 형성된 플라즈마원은 point source인 LMIS와 달리, 하나의 이온원으로 다중의 이온빔을 인출할 수 있어서 semi-parallel process가 가능한 차세대 집속이온빔 시스템의 개발이 가능하다. 이러한 semi-parallel process는, 지금까지 집속이온빔 시스템의 최대 단점으로 지적되어온 serial process의 한계를 극복할 수 있는 대안으로 판단된다.

후기

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 차세대신기술개발사업인 "이온빔 이용 나노가공용 장비개발"과제로부터 지원을 받아 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Reyntjens, S. R. and Puers, R., 2001, "A review of focused ion beam applications in microsystem technology", *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 11, pp. 287~300.
- (2) Melngallis, J., 1987, "Critical Review: Focused ion beam technology and applications", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 5, No. 2, pp. 469~495.
- (3) Guharay, S. K., Sokolovsky, E., and Orloff, J., 1999, "Characteristics of ion beams from a Penning source for focused ion beam applications", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 17, No. 6, pp. 2779~2782.
- (4) Zhang, H., 1999, *Ion Sources*, Springer, New York, pp. 63~64.



- SNU : Seoul National University Ion source (using 2kW RF power, 0.01mm aperture, M=0.1 demagnification)
- LMIS : Liquid metal ion source (FEI co., USA, currently used for FIB)
- Penning : Penning ion source (U. of Maryland, USA)
- Multi-cusp : Multi-cusp RF ion source (LBNL, USA)
- GFIS : Gas field ion source (Not much used due to cryogenic system)

Fig. 6. 국외 연구기관의 이온원과의 휘도 비교