

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.3.185

## 갈륨 소스를 이용한 집속이온빔 컬럼 개발

김창조\* · 이재승\* · 최 윤† · 최은하\*\* · 박철우\*\*\* · 김종국\*\*\*\* · 김영권\*\*\*\*\* · 엄창용\*\*\*\*\*  
(2008년 10월 10일 접수, 2009년 2월 20일 수정, 2009년 2월 24일 심사완료)

### Development of Focused Ion Beam Column Using Ga Source

Gim TzangJo, Lee JaeSeung, Choi Yoon, Choi EunHa, Park ChulWoo, Kim JongKuk, Kim YoungGweon and Um ChangYong

**Key Words :** FIB(집속이온빔), Electro Static Lens(정전렌즈), Deceleration Mode(감속모드), LMIS(액체금속 이온원), Chromatic Aberration(색수차)

#### Abstract

Focused ion beam system was designed, which includes LMIS, electrostatic lens and high voltage power supply. Control program is updated for high speed image processing. The details of vibration-free vacuum system and other important electrical parts were trouble-shooted for appropriately controlling high acceleration voltages.

#### 기호설명

- d : 빔 직경 (nm)
- E : 빔 가속전압 (kV)
- $\Delta E_{1/2}$  : 이온빔의 에너지 분포 (V)
- Cc : 색수차
- Cs : 구면수차
- A : 이온빔의 반각(rad)

#### 1. 서론

영국의 Roy Clampitt 등에 의해 액체금속 이온원(LMIS : Liquid Metal Ion Source)이 최초로 시사된 이후, 1980년대 중반부터 본격적인 개발이

시작된 FIB(Focused Ion Beam) system<sup>(1)</sup>은 정전렌즈를 이용해 직진 비행을 하는 이온을 시편의 한 지점에 집속시키는 장치로, 집속된 이온의 에너지를 이용해 표면관측, 가공 그리고 증착 등 다양한 작업을 수행할 수 있는 장점을 가지고 있다.

집속이온빔 장치의 경우 시편 표면의 가공 및 CVD(Chemical Vapor Deposition) 공정을 통한 금속의 증착이 가능한 것이며, 이를 통해 TEM 시편의 제작, 미세 패턴의 수정 및 보수 등 그 활용 범위가 크게 확대 되었다.

세계적으로 FIB system을 제작하는 회사로는 미국의 FEI, 독일의 Carl Zeiss, 일본의 SII, Hitachi 등의 회사가 있으며, 국내에서 사용중인 FIB system의 점유율은 FEI사 제품이 가장 높다. Carl Zeiss의 경우 최대 5nm의 이온빔 집속기술을 자랑하고 있으며, FEI사의 경우 최대 7nm의 이온빔 집속기술을 자랑하고 있다.

FIB system의 상용화를 위해 핵심적으로 이루어져야 하는 기술은 고전압이 인가되는 정전렌즈의 표면 가공기술로 micro burr의 제거가 핵심사항이며, 전극 조립 시 정확한 기계적 배열이 이루어져야 한다. 30kV의 고전압이 인가된 이온빔 발생부에서 안정적인 빔이 지속되어야 하며, 발생된 이온빔이 시편에 집속되기까지 정전기적 배열에

[이 논문은 2008년도 생산 및 설계공학부문 춘계학술 대회 (2008. 6. 4-5. 제주오리엔탈호텔) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 아텍시스템 부설연구소  
E-mail : yoonchoi@paran.com  
TEL : (032)508-8067 FAX : (032)508-8069

\* 아텍시스템 부설연구소

\*\* 광운대학교 전자물리학과

\*\*\* 한국산업기술대 기계공학과

\*\*\*\* 한국기계연구원

\*\*\*\*\* (주) FTLab

\*\*\*\*\* (주) 컨백스

어긋남이 없어야 하며, 인가된 고전압의 경우 빔 인출 동안 100ppm 이하의 ripple 만이 허용된다.

세계적인 기업들의 경우 장기간에 걸쳐 집속이온빔 설계, 가공, 제작 및 배열, 인가파워 등 집속이온빔 요소기술 분야에 깊이있는 기술을 축적하였는 바 본 논문에서는 갈륨소스를 이용한 집속이온빔 컬럼의 제작 및 이와 관련된 실험결과를 정리함으로써 집속이온빔 컬럼 제조에 있어서 기초자료를 제공하는데 목적이 있고, 현재 진행 중인 각 모듈별 상세 연구내용에 대해서는 추후 지속적으로 보고될 예정이다.

1.1 LMIS(Liquid Metal Ion Source)

본 집속이온빔 시스템에서 사용한 이온빔은 광운대학교에서 제작한 LMIS 를 사용하였다.

LMIS 는 Ga 이 충전되어 있는 충전소 부분과 Ga 을 가열하여 기화시키는 히터, 그리고 30kV 의 가속전압과 10kV 의 추출전압을 인가할 수 있는 전극구조로 되어 있다.

Ga 은 히터와 팁 사이의 공간에 위치하는데, 팁은 용융된 Ga 이 흘러내릴 때, 그 반각이 Taylor cone 의 각도를 유지하도록 끝 부분이 예리하게 가공되어 있으며, 팁 끝과 추출전압이 인가되는 전극 사이의 거리는 0.5mm 의 간격을 유지한다. 이것은 추출전압과 가속전압이 5kV 의 전위차를 보일때 이온이 용융된 Ga 으로부터 쏟아져 나오도록 하는 원동력이 되는데, 팁끝과 추출전극간의 거리가 너무 가까우면, 급격한 빔 전류의 증가를 가져오게 되므로 적절한 간격 조절이 필요하다. LMIS 의 구조를 Fig. 1 에 나타내었다.

집속이온빔 시스템에서의 이온빔은 다음과 같은 특성을 지녀야만 한다.

- 1) 고전류밀도(high current density : ~1.0A/cm<sup>2</sup>)
- 2) 고선명도(high brightness : ~10<sup>6</sup>A/cm<sup>2</sup>sr)
- 3) 낮은 에너지분포(low energy spread : ~10eV)

1.2 ESL (ElectroStatic Lens)

LMIS 로부터 발생된 이온 빔은 추출전압 및 가속전압에 의해 직선 비행을 하게 되는데, 이때 이온빔은 모든 방향으로 퍼져 나가게 된다.

이 이온빔을 집속시키는 방법으로 정전렌즈를 사용하는데, 정전렌즈는 구조에 따라 최대 3 개까지 설치가 되는 경우도 있다. 본 실험에 사용된 구조에서는 2 개의 렌즈가 사용되었는데, 하나는 LMIS 로 부터 방출된 이온빔을 응집시키는 1 차 렌즈이며, 다른 하나는 시편 쪽으로 빔을 집속시

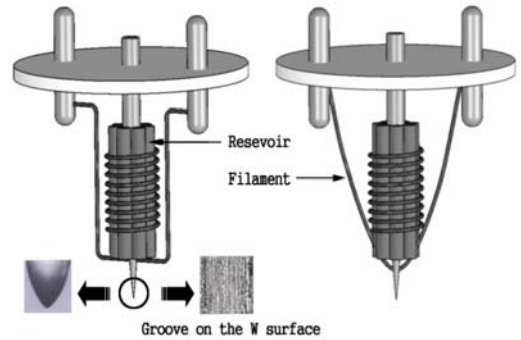


Fig. 1 A schematic diagram of LMIS

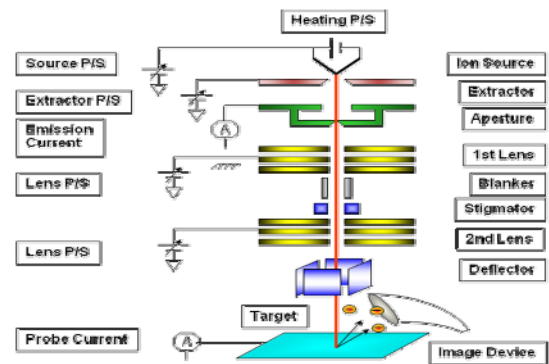


Fig. 2 A schematic diagram of FIB system

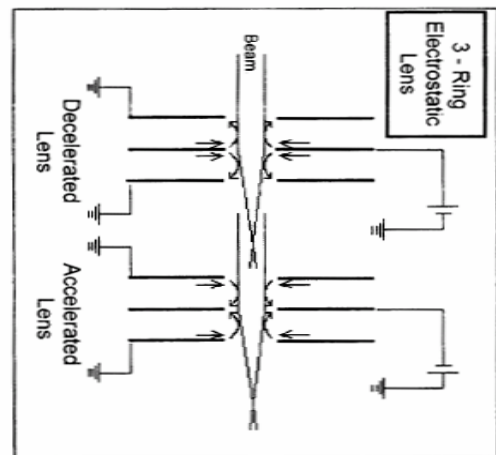


Fig. 3 A schematic focused ion beam diagram of acceleration and deceleration mode

키는 2 차 렌즈이다.

이온빔의 집속에는 2 차 렌즈의 역할이 특히 중요한데, 2 차 정전 렌즈는 3 개의 전극으로 이루어진 3 극 전극으로, 전압이 인가되는 전극 1 개와 접지에 연결되는 2 개의 전극으로 구성되어 있다. 전압이 인가되는 전극은 다른 두개의 전극 가운데에 놓이는 구조로 되어있다.

Fig. 2 에 LMIS 를 비롯한 각 구성품이 묘사되어 있는 집속이온빔 시스템의 컬럼부 구성도를 나타내었다. 가운데 전극에는 + 전압이 인가되는데, 위, 아래 위치한 전극이 접지 이므로, 직경  $r$  을 갖는 전계가 가운데 전극을 중심으로 위, 아래로 형성된다. 추출전극을 통해 렌즈로 입사되는 이온빔은 이 전계에 의해 집속되며 가속되게 된다.

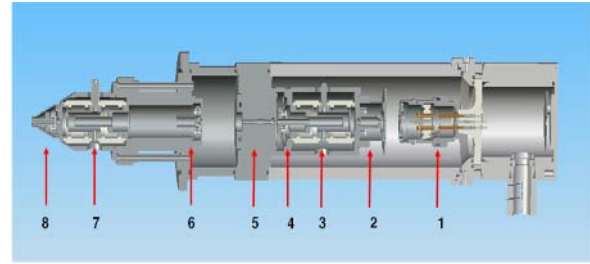
Fig. 3 에 두 가지 모드 of 빔 집속상태를 모식도로 나타내었다.

3 극으로 구성된 정전렌즈의 경우, 각 전극간 간격과 전극의 두께, 그리고 이온빔이 전극을 지날 수 있도록 형성한 홀(hole)의 직경이 그 성능을 좌우하게 되는데, 이러한 렌즈의 각 부분 사이즈는 시뮬레이션을 통해 대부분 그 값을 정하게 된다.<sup>(2,3)</sup> 전극간 간격 5mm, 전극두께 2mm, 홀 직경 3mm에서 가장 좋은 빔 집속도를 보이는 시뮬레이션 결과가 보고된 적 있다.<sup>(3)</sup> 본 실험에 사용된 정전렌즈의 구조는 이 시뮬레이션 결과와 동일한 사이즈로 제작되었다.

## 2. 실험진행

### 2.1 집속이온빔 시스템

본 실험에 사용된 집속이온빔 시스템은 크게 컬럼부와 챔버부로 나누어 지는데, 컬럼부에는 LMIS, 정전렌즈, 가변 aperture, stigmator, gate valve, 컬럼부의 진공을 형성시키기 위한 pumping system 그리고 deflector 로 구성되어 있고, 챔버부에는 시편을 위치시키는 stage, stage 구동용 stepping motor system, 그리고 진공을 형성시킬 수 있는 pumping system 으로 구성되어 있다. Fig. 4 에 컬럼부의 모식도를 나타내었고, Fig. 5 에 전체 집속이온빔 시스템의 사진을 나타내었다. 기본적인 구조 이외에 영상을 확인할 수 있는 SED(Secondary Electron Detector)가 장착되어 있다. 영상을 확인하는 장치로써 SED 외에 SIM, CEM 등이 있는데, 세가지 모두 PMT(Photo Multiplier Tube)를 이용한 전압증폭을 통해 영상을 확인하는 장치들로써 각각 장단점이 있으며, 이 또한 FIB 를 제작하는 회사마다 다르지만, 대부분의 경우 SED 를 사용한다. SED 는 이온빔이 시편에 충돌할때 발생하는 2 차 전자에 의해 빛을 발산하는 scintillator, 그 빛을 받아 전자를 증폭하는 PMT, 증폭된 전자의 전류값을 한번 더 증폭하는 증폭기, 그 증폭기의 신호를 영상으로 처리해 주는 이미지 변환 보드로 구성된다.



- |                    |  |
|--------------------|--|
| 1. LMIS            | 5. Variable aperture and isolation valve |
| 2. Faraday cup     | 6. Stigmator                             |
| 3. Condensing lens | 7. Objective lens                        |
| 4. Beam blaster    | 8. Deflector                             |

Fig. 4 A schematic diagram of FIB column



Fig. 5 FIB system

### 2.2 Aperture 의 장착

FIB system 에는 기구적으로 가공 초기부터 홀을 제작해 놓은 전극부에 형성된 aperture 와 이온빔량을 조절하기 위한 가변 aperture 가 기본적으로 장착된다. 가변 aperture 는 총 4 개의 홀을 가지고 있는데, 홀 직경은 각각 30, 50, 100, 200  $\mu\text{m}$ 이다.

이러한 기본적으로 장착되는 aperture 이외에 1 차 렌즈 상단부에 초기 빔량을 제어하고, 색수차를 감소시키기 위한 aperture 를 추가로 장착하였는데, 이를 고정형 aperture 라 하고, 그 홀의 직경은 각각 800, 50  $\mu\text{m}$ 이다. 50  $\mu\text{m}$ 의 aperture 는 국내 etching 기술로 제작하였는데, 50  $\mu\text{m}$  이하의 홀 직경은 가공이 매우 어려워 국내에서는 제작하지 못하였다. 이 aperture 의 두께는 200  $\mu\text{m}$ 이며, 재질은 Mo 이다.

### 2.3 가속전압

통상적으로 집속이온빔 시스템에 사용되는 가속전압은 30kV 이지만, 집속 이온빔의 직경이 인가된 가속전압에 반 비례하므로 50kV, 100kV 의 가

**Table 1** FIB performance @ ACC 30kV

Maximum probe current density		9A/cm <sup>2</sup>
Maximum probe current		2nA
Stage	X axis	0~100mm
	Y axis	0~80mm
	Z axis	0~10mm
	T axis	0~60°
	R axis	0~360°
Maximum sample size		100Φ, 15t

속전압에 대해 전산모사를 통하거나 50kV 이상의 가속전압을 인가한 경우도 있다.<sup>(5,7,8)</sup>

본 실험에 사용된 FIB system 의 경우 초기 18kV 까지의 가속전압 인가만이 가능했으며, 이후 몰딩을 통한 절연처리를 통해 30kV 를 인가하여 테스트 하였다.

### 3. 실험 결과 및 논의

#### 3.1 FIB system 의 기본적 특성

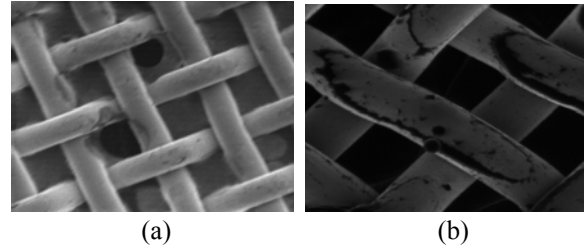
Table 1 에 본 실험에 사용된 집속이온빔 시스템의 기본적인 이온빔의 특성과 하드웨어적 수행력을 정리하였다.

LMIS 에 30kV 를 인가한 상태에서 빔 집속직경 30nm 에서 기관에 도달한 최대 이온빔 전류값은 80pA 였으며, 이를 통해 기관에 도달하는 최대 전류 밀도를 계산하였다. 기관에 도달하는 최대 이온 빔 전류값은 50 μm의 고정형 aperture 만을 사용한 경우에 측정된 값이다. 기본적으로 시료대는 5축으로 이루어져 있으며, 이를 통해 시료대에 올려진 시편의 위치를 용이하게 탐색할 수 있으며, 이후 3 차원 가공을 진행함에 있어 유용하다.

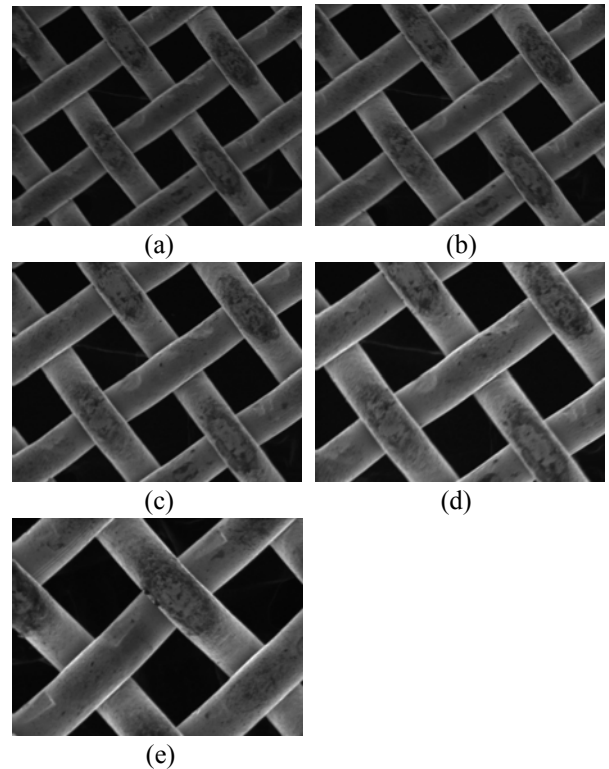
#### 4.2 색수차 조절을 통한 영상의 선명도 확인

집속이온빔 시스템의 컬럼부 조립 시, 최대한 기계적 배열을 맞추어 구면수차를 감소시킨 상태에서 1 차 렌즈 상단의 고정형 aperture 를 변경하여 색수차를 조절함으로써 영상의 선명도에 미치는 영향을 확인하였다.

Fig. 6 에 고정형 aperture 의 직경에 따른 영상의



**Fig. 6** SED images with fixed aperture size ; (a) 800 μm, (b) 50 μm



**Fig. 7** SED images with acceleration voltages ; (a) 18kV, (b) 20kV, (c) 23kV, (d) 25kV and (e) 30kV

선명도 변화를 나타내었다.

Fig. 6 의 영상을 확인할 때의 가속전압은 16kV 였으며, 가변형 aperture 의 size 는 30 μm였고, 시편은 50 μm 두께의 mesh 를 사용하였다. 고정형 aperture 의 직경이 작아짐에 따라 색수차가 현격히 감소했음을 알수 있는데, 이는 색수차 계수가 aperture 직경에 크게 좌우되고 있음을 단적으로 보여주고 있다. 고정형 aperture 의 직경을 감소시킴에 따라 색수차를 최대 70%가량 감소시킬 수 있었다. 이때의 집속 이온빔의 사이즈는 800 μm의 aperture 를 사용한 경우 약 5~600 μm였으며, 50 μm의 aperture 를 사용한 경우 약 48~52 nm였다.

4.3 가속전압에 따른 이온빔 집속도

가속전압을 증가시키는 경우, 집속 이온빔의 사이즈는 더욱 작아지게 된다. 이온빔의 가속전압을 증가시키면, 화면상에서 보여지는 영상이 점차적으로 확대되어 보여지게 되는데, 이는 이온 빔의 집속 사이즈가 가속전압에 따라 점차 감소하고 이에 따라 분해능이 증가하고 있음을 나타낸다.

Fig. 7 에 가속전압에 따른 영상의 선명도 변화를 나타내었다.

가속전압을 변화시켜 영상을 확인하는 실험은 설치되어 있는 가변 aperture를 사용하지 않은 상태인데, 그것은 30 $\mu$ m의 가변 aperture를 사용 매우 낮아 SED를 통한 영상확인이 불가능하기 때문이었다.

Fig. 7 의 영상은 모두 50  $\mu$ m 두께의, mesh 를 측정된 것으로, 가속전압이 증가함에 따라 화면상의 영상이 확대되어 분해능이 향상되었음을 알 수 있다.

4. 결 론

국내 기술로 제작된 고전압 인가용 파워써플라이와 1 차렌즈의 고정형 aperture, 가변형 aperture 만을 이용하여, LMIS 로 부터 발생시킨 이온빔을 약 30 nm가량 집속시켰다.

가속전압 30kV 와 1 차 렌즈의 50  $\mu$ m 홀 사이즈를 갖는 고정형 aperture 를 통해 분해능이 향상된 영상을 얻을 수 있었으며, 이때 기관에 도달하는 최소 빔 량은 5 pA, 최대 빔량은 80 pA였다.

참고문헌

(1) Kyoung-Hwan Hwang, Eun-Ha Choi, Yoon-Ho Seo,

Gwang-Sub Cho and Seung-Un Kang, 1994, "Measurement of Focused Ion Beam Size," *Korea Applied Physics*, Vol.7, No.6, pp. 523~527

(2) Gary A. Glass, Bibhudutta Rout, Alexander D. Dymnikov and Elia V. Eschenazi, 2006, "High Energy Focused Ion Beam Nanoprobes: Design and Applications," *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 908E, pp. 68~80.

(3) Kenji Kurihara, 1984, "Low-Aberration Einzel Lens for a Focused-Ion-Beam System," *Japanes Journal of Applied Physics*, Vol. 24, No. 2, pp. 225~230.

(4) Kiyoshi Sakaguchi and Tetsu Sekine, 1998, "Focused Ion Beam Optical Column Design and Consideration on Minimum Attainable Beam Size," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 16, No. 4, pp. 2462~2468.

(5) Toru Itakura, Kei Horiuchi and Sumio Yamamoto, 1984, "Design and Fabrication of a 50kV Ion Beam Column," *Fujitsu Sci., Tech. J.*, Vol. 20, No. 4, pp. 447~465.

(6) Tohru Ishitani, 1995, "Coarseguidelines in Gesigning Focused Ion Beam Optics," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 13, No. 2, pp. 371~374.

(7) R. AIHARA, H. SAWARAGI, B. THOMPSON and M.H. SHEARER, 1989, "Development of Focused Ion Beam System," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B37/38, pp. 212~217.

(8) Jon Orloff and Pierre Sudraud' "Design of a 100kV, High Resolution Focused Ion Beam Column with a Liquid Metal Ion Source," *Microelectronic Engineering*, Vol. 3, pp. 161~165.