

FIB를 이용한 나노가공공정 기술 개발

최헌종*, 강은구+, 이석우+, 홍원표+

Development of Nano Machining Technology using Focused Ion Beam

Hon-Zong Choi*, Eun-Goo Kang+, Seok-Woo Lee+, Won-Pyo Hong+

Abstract

The application of focused ion beam (FIB) technology in micro/nano machining has become increasingly popular. Its use in micro/nano machining has advantages over contemporary photolithography or other micro/nano machining technologies, such as small feature resolution, the ability to process without masks and being accommodating for a variety of materials and geometries. This paper presents that the recent development and our research goals in FIB nano machining technology are given. The emphasis will be on direct milling, or chemical vapor deposition techniques (CVD), and this can distinguish the FIB technology from the contemporary photolithography process and provide a vital alternative to it. After an introduction to the technology and its FIB principles, the recent developments in using milling or deposition techniques for making various high-quality devices and high-precision components at the micro/nano meter scale are examined and discussed. Finally, conclusions are presented to summarize the recent work and to suggest the areas for improving the FIB milling technology and for studying our future research.

Key Words : FIB(Focused Ion Beam), Nano machining technology, Photolithography, Sputtering, CVD(Chemical Vapour Deposition)

1. 서론

이온빔 이용 나노 가공공정 기술은 신산업의 정밀도 요구에 부응하는 극미세/극초정밀 제품의 제조에 기여하며, 나아가서는 이의 응용 기술을 야기함으로써

생산기술 전반에 걸친 막대한 기술적 파급효과와 정보통신기술, 바이오기술, 환경기술, 우주항공기술, 로봇기술 등과 연관된 Synergy 효과를 미칠 것으로 예상된다. 현재 이온빔 가공장비의 주용도는 TEM 시편 제작, 반도체 패턴 유지 및 보수 등에 국한되어 있으며,

* 발표자, 한국생산기술연구원(choihz@kitech.re.kr)

주소: 충남 천안시 입장면 홍천리 35-3

+ 한국생산기술연구원 나노가공팀

기타 응용기술에 대한 연구는 전무한 실정이다. 이에 반해 나노 가공기술은 초소형 정밀 마이크로 부품 및 첨단 디바이스 개발 등에 필요한 기능성 재료의 가공을 실현하기 위해서 필수적으로 요구되는 기술이며, 그 응용분야는 더욱 확대될 것이다. 이에 나노 관련 응용상품 개발을 목표로 하여 장비 개발과 동시에 병행하여 이온빔을 이용한 나노 가공공정 및 응용기술 개발을 추진함으로써 차세대신기술개발사업 성과의 극대화에 기여할 것으로 기대된다.

최근의 마이크로 및 나노가공기술에 있어 소형화에 대한 주제가 이슈화되고 있으며, 이는 다양한 제품들에 이용되어지는 많은 부품들이 점점 작아지고 있기 때문이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 마이크로 및 나노수준의 부품 개발에 초점이 맞추어진 이온빔 응용 직접묘화 기술 관련 최신 동향을 조사한 결과이다.

FIB는 매우 짧은 파장과 매우 높은 에너지를 이용하기 때문에 1 μ m이하의 크기를 갖는 구조물을 직접 제작이 가능하다고 할 수 있으며, 결과적으로 FIB는 높은 성능을 갖는 마이크로 장치나 높은 정밀도를 갖는 마이크로 구조물의 제작에 있어 최근에 그 이용범위가 널리 확대되고 있는 추세이다. 현재 FIB는 반도체 산업에서 매우 강력한 도구로 이용되어 지고 있으며, 주로 마스크 수리, 장치 교정, 결함 분석, 집적회로의 오류 수정 등의 용도로 사용되어 졌다. FIB의 기본적인 기능으로는 모재를 제거함으로써 원하는 형상을 만드는 Sputtering, 특정 재료를 쌓아가며 구성된 재료에 기능 또는 형상을 유도하는 CVD, 특정 재료를 침투시켜 그에 상응하는 기능을 유도하는 Implantation과 재료를 분석할 수 있는 기능이 모두 가능하다.

본 논문에서는 FIB기능 중 Sputtering에 관한 내용을 중점적으로 기술하였다. FIB를 이용한 Sputtering에 있어 중요한 파라미터는 이온빔 직경, 분포, 전류와 에너지이며, 최종적으로는 복잡한 3차원 형상을 높은 정밀도로 가공하기 위해 원하는 위치와 요구되는 재료 제거량을 고려하여 적절한 파라미터 제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 강력한 이온에너지가 시편에 충돌될 때, 이온과 시편과의 상호작용에 의한 부풀어 오름, 증착, 침투, 되튀김 현상 등이 발생할 수 있다(Brodie and Muray 1992). Sputtering에서 보다 중요한 상호작용은 이온에서 재료로 얼마나 충분한 에너지가 전달되는가 하는 것이며, 이러한 에너지의 크기에 의해 재료 제거시 발생하는 중요한 두 가지 현상인 Sputtering과 재증착

(redeposition)과정에 많은 영향을 미치게 된다. FIB에서 대부분의 기계 재료에 대해 적절한 이온 에너지는 10-100keV 영역에 해당된다. 그러나 100keV이상일 경우 이온이 재료에 침투하여 재료내부에 갇혀 버리는 현상이 발생한다.

최근 FIB의 Sputtering 관련 기능이 광학적, 자기적, 전기적, 전자적, 기계적, 열유체학적, 생화학적, 생물 의료 분야의 다양한 제품 제작에 적용되어 지고 있다. 이러한 관심이 다양한 Sputtering 관련 연구로 이어져, 마이크로 디바이스나 구조물의 정밀가공을 주제로 한 연구가 활발해지고 있다. 기존 FIB를 이용한 Sputtering 관련된 연구는 이온 종류, 입사각, 이온에너지 그리고 시편과 이온과의 상호작용 등이 수치적인 계산과 실험 결과와의 정량적인 비교를 통해 수행되어 졌으며, 결과적으로 정밀 Sputtering 가공의 최적 조건을 찾기 위한 연구 진행되어 지고 있다. 특히, Sputtering시 최근 까지도 문제가 되고 있는 현상인 재 증착 현상에 관한 연구가 진행되고 있으며, 기초적인 단일경로를 가공함으로써 발생하는 가공형상 연구 뿐만 아니라, 다중경로를 통한 재 증착 또한 연구 되어지고 있다. 원하는 형상의 가공시 Sputtering의 주사 순서에 따른 효과에 대한 연구도 진행되어 지고 있다. 본 논문에서는 이러한 FIB Sputtering에 관한 현재까지의 연구결과에 대한 사전조사결과 일부로 향후 FIB를 이용한 나노가공기술의 전망 예측에 대해 관련 연구자에게 많은 도움을 줄 것으로 생각한다.

2. FIB 장치 소개

2.1 Focused Ion Beam 장비

Fig. 1은 가공실험에 사용될 FIB 장비이다. 일본 SEIKO장비로서 모델명은 SM18800이다. 시편을 진공 챔버내로 초고진공을 효과적으로 유지하면서 삽입하거나 제거하기 위한 load-lock 장치가 설치되어 있다. Table 1은 이온의 집속 또는 수차제거 등에 관한 사양을 나타내었다. 이온 소스는 Ga⁺를 이용하고 있으며, 렌즈는 상하 두 개를 가지고 있다. 또한 하부에 있는 aperture는 5개의 직경으로 자동조절이 가능하며, 배율은 80,000배 까지 가능하다. 최소 분해능은 0.03 μ m정도이며, 그 때의 적정가속도는 30keV 이다.

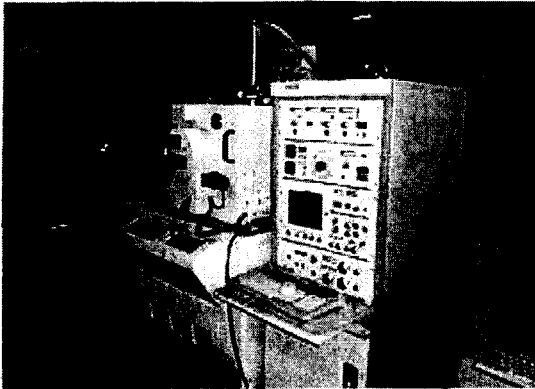


Fig. 1 Photograph of Focused Ion Beam (SM18800, SEIKO, Japan)

Table 1 Specifications of ion optical system

Items	Specifications
Ion Source	Ga ⁺ LMIS
Lens	2 lens electrostatic
Astigmatic Correction	8 pole electrostatic
XY deflection	Electrostatic
Blanking	Electrostatic
Aperture	Adjustable(5 settings)
Accelerated Voltage	by 5kV steps (20kV-50kV) (30kV recomm.)
Magnification	X100 - X80,000
Resolution	0.03 μ m (with acc. vol. at 30kV)

Table 2는 이송스테이지 관련 사항을 나타내고 있으며, 전체는 X, Y, Z, θ , Tilting으로 총 5축으로 구성되어 있다. 이송범위는 200 \times 200 \times 20mm이며, 분해능은 수백 μ m 정도이다.

Table 2 Specifications of sample drive system

	Stroke	Resolution	Max. Feedrate
X	200mm	0.125 μ m/step	5mm/sec
Y	200mm	0.125 μ m/step	5mm/sec
Z	20mm	0.5 μ m/step	2.5mm/sec
θ	360 $^\circ$	0.0013 $^\circ$ /step	
T	60 $^\circ$	0.0001 $^\circ$ /step	

Table 3은 진공 챔버내의 진공펌프 관련 사항으로

$10^{-7} - 10^{-8}$ torr 정도의 진공도의 유지가 가능하다. 이온 챔버가 5×10^{-7} torr 정도로 가장 낮은 진공을 유지하며, 메인 챔버는 5×10^{-7} torr 정도이다.

Table 3 Specifications of evacuation ventilation system

Evacuation System	Main Chamber	1000 ℓ /sec Magnetic levitation TMP 340(50Hz)/410(60Hz) ℓ /min RP
	Ion Source	200 ℓ /sec Magnetic levitation TMP 340(50Hz)/290(60Hz) ℓ /min RP
	Sub Chamber	50 ℓ /sec Noncontact levitation TMP
Ultimate Vacuum	Main Chamber	5×10^{-7} torr or less (3×10^{-7} torr or less using liquid N ₂ trap)
	Ion Chamber	5×10^{-7} torr or less
	Electron Gun Chamber	1×10^{-8} torr or less(SE)
	Sub Chamber	5×10^{-6} torr or less

2.2 FIB system의 구성

FIB 시스템의 기본적인 구성품은 이온빔 소스, 이온 광학 칼럼, 빔 전향장치와 시료 이송장치이다. Fig. 2는 2개의 렌즈를 가진 Column의 대략적인 개념도이다. LMIS(Liquid Metal Ion Source)는 다양한 이온 소스에 대해 신뢰성 있고 안정적인 이온빔을 제공하는 데 이용되어 지고 있다. Fig. 2를 보면 LMIS는 일반적으로 모세관 튜브와 미세 바늘로 구성되어 있으며, extraction전극과 차폐물로 구성되어 있다. 모세관 튜브는 액체 금속을 미세 바늘에 전달하기 위한 저장소로서 작동된다. extraction전극과 표면장력에 의해 발생하는 강한 정전력의 상호 작용이 액체금속이 날카로운 꼭지의 원뿔모양으로 만든다. 이것이 잘 알려진 Taylor cone이다. 액체 금속에 관해 결정적 Taylor 전압을 응용하여 양 이온화된 이온을 추출한다. 이온은 상부렌즈(condenser lens)에 의해 평행빔으로 비행하게 된다. 그런 다음 질량 분리기와 드리프트 튜브를 통하여 지나가게 된다. 질량분리기는 질량과 전하량에 대한 비율을 조절하여 요구하는 이온의 양만이 통과하도록 제한하는 장치이다. 질량분리기 아래쪽에는 길고 얇은 드리프트 튜브가 있다. 드리프트

트 튜브는 이온의 방향이 수직이 아닐 경우 이를 제거하는 기능을 한다. 하부의 렌즈(objective lens)는 드리프트 튜브 아래쪽에 위치하고 있으며, 이온빔의 초점 직경을 작게 만들고 초점이 잘 맞도록 하는 기능을 한다. 하부 렌즈 다음으로는 정적기력을 이용한 빔 전향장치가 있다. 이 렌즈는 시료에 이온빔 최종 도착 경로를 제어하는데 이용되고 있다. Fig. 1에서 보이는 노즐은 FIB Sputtering시와 CVD시 가스의 주입에 사용되어 진다.

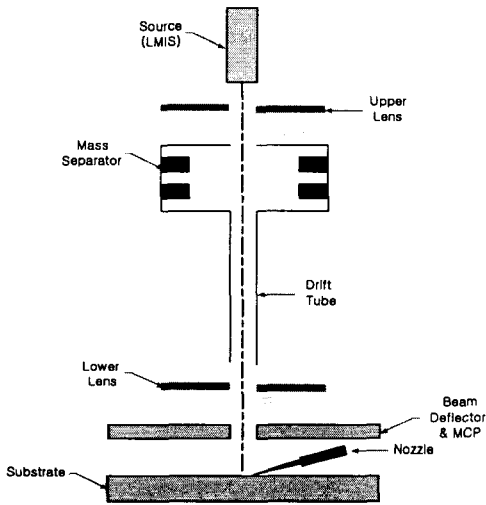


Fig. 2 Schematic diagram of a two-lens FIB system

일반적으로 다채널 플레이트(MCP)가 시편 위쪽에 설치되어 진다. MCP는 2차 전자를 기록하기 위한 장치이며, 표면을 관찰하기 위한 도구로서 사용되어 진다. 일반적으로 SIMS로 불리우고 있다.

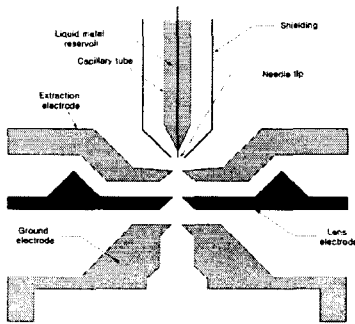


Fig. 3 LMIS in a two-lens FIB system

전반적인 환경을 10^{-7} torr 정도의 초고진공환경에서

작동되어 진다. 이는 이온의 평균자유행로를 증가시키며, 챔버내의 다른 입자와의 간섭으로 인해 이온빔의 강도가 약해지는 것을 막기 위함이다. 이러한 시스템에 의해 50-250keV의 이온 에너지를 발생시킬 수 있으며, FWHM의 최소 빔직경은 50nm이하 까지 줄일 수 있다. FWHM은 일반적으로 FIB의 직경을 기술하는데 사용되어 지며, 이는 이온빔의 강도가 Gaussian 분포와 매우 유사하다고 판단하고 있기 때문이다. FWHM은 또한 빔 강도의 최대값의 반에 해당하는 강도 프로파일의 위치간의 거리로서도 정의된다.

2.3 FIB sputtering의 주사방식

컴퓨터에 의해 제어되는 FIB장비는 Sputtering시 픽셀 단위씩 실행된다. 이것은 디지털 스캔으로도 알려져 있으며, Fig. 4에 개략적인 그림이 나타나 있다. 빔이 주어진 위치에 남아 있는 시간을 Dwell시간(t_d)으로 부르고, 두 개의 인접한 픽셀의 중심사이의 거리를 pixel spacing(p_s)이라고 부르고 있다.

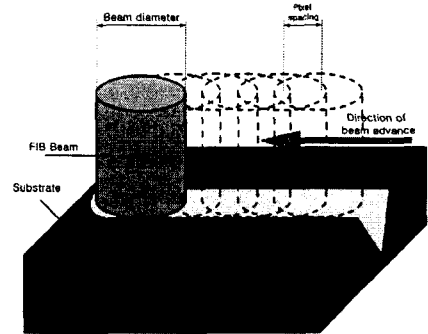


Fig. 4 Schematic diagram of FIB sputtering

재료의 가공 및 이미지화 등을 수행하는 방식으로 원하는 영역을 수평, 수직방향의 픽셀단위 배열화가 이루어진다. Fig. 5에서 보면 주사방식에 따라 일반적으로 raster와 serpentine 주사가 이루어진다. 주사 순서는 순서적으로 한 라인씩 진행되어 진다. Fig. 5(a)의 raster 주사 방식은 전 주사 동안에 걸쳐 같은 방향으로만 움직이는 반면, Fig. 5(b)의 serpentine 주사 방식은 매 주사 방향이 바뀌어 진다. 그림에서 실선은 빔이 이송하는 경로를 뜻하며, Sputtering 등은 각각의 픽셀에서 이루어진다. 반면 점선의 경우는 빔이 되돌아가는 경로를 뜻하며, 이 경로에서는 Sputtering 등이 이루어지지 않는다. 또한 화

살표는 빔의 진행 방향을 뜻하고 있다. 일반적으로 raster 주사방식이 많이 쓰이고 있다. 매우 미세적으로 벡터 주사가 가능한 FIB장비가 연구용으로 채택되고 있으나, 방식차체가 높은 정도의 마이크로 구조물을 제작하기 위해서는 상당히 큰 저장용량을 차지한다. 따라서 상용 FIB 가공기의 경우 거의 사용되어지지 않고 있다. Sputtering에서는 raster와 serpentine 주사 방식이 일반적으로 사용되어지고 있으나 주사방식에 따른 Sputtering 결과에는 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 알려져 있다.

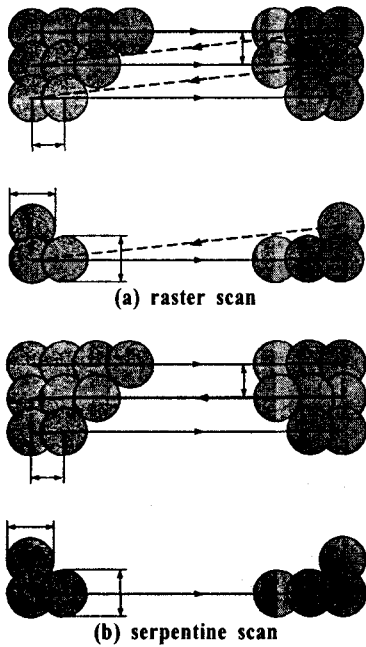


Fig. 5 Scanning procedures with arrows indicating scanning direction

4. 결론

FIB 기술은 아직 다른 반도체 제작 공정에 비해 상대적으로 여전히 연구가 미흡한 상황이다. 현재의 마이크로 가공기술과 나노가공기술의 주요한 문제점 중의 하나가 높은 생산성을 유지하면서 형상크기를 어떻게 줄이느냐에 달려있다고 할 수 있다. 현재 FIB가공기술을 제품 생산라인에 적용하기 위해서는 재료제거량을 보다 향상시켜야 함은 틀림없는 사실이다. 이를 위해 이온 빔 크기의 변화가 가능하여 황삭가공과 정삭가공이 가능하도록 하는 방식의 채택이 이의 대안이 될 수 있을 것

으로 예상된다. 따라서 향후 마이크로가공기술 및 나노가공기술에 관련된 산업전반에 FIB를 적용하기 위해서는 생산성에 대한 고려가 필요하며, 이의 문제가 해결될 경우 향후 FIB가 이 분야에 주류를 형성할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 산업자원부 차세대신기술개발사업 “이온 빔 이용 나노가공용 장비 개발” 과제의 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) H. Yamaguchi, A. Shimase, S. Haraichi and T. Miyauchi, 1985, "characteristics of silicon removal by fine focused gallium ion beam", *Journal of Vacuum Science and Technology*, B 3(1), pp.71~74
- (2) J. Melngailis and C. R. Musil, 1987, "The focused ion beam as an integrated circuit restructuring tool ", *Journal of Vacuum Science and Technology*, B 4(1), pp. 176 ~ 180
- (3) L. R Harriott, R. E Scotti, K. D. Cummings and A. F Ambrose, 1987, Micromachining of optical structures with focused ion beams", *Journal of Vacuum Science and Technology*, B 5(1), pp. 207~210
- (4) P. sudraud, and G. Ben Assayag 1988, characteristics of silicon removal by fine focused gallium ion beam", *Journal of Vacuum Science and Technology*, B 6(1), pp. 234 ~ 238
- (5) M. Jvasile, Z. Niu, Massar, W. Zhang and S. Liu, 1997, "focused ion beam milling: control for three-dimensional mirofabrication", *Journal of Vacuum Science and Technology*, B 15(6), pp. 2350~2354
- (6) D. Santamore, K Edinger, J. Orlof and J. Melngailis, 1997, "Focused ion Beam sputter yield change as a function of scan speed", *Journal of Vacuum Science and Technology*, B 15(6), pp.2346~2349