

◆특집◆ 에너지빔 이용 정밀가공 기술

FIB-Sputtering 가공공정기술 및 응용분야 연구

강은구*, 최병열*, 홍원표*, 이석우*, 최헌종*

FIB-Sputtering Process Technology and Its Application

Eun Goo Kang*, Byoung Ryul Choi*, Won Pyo Hong*, Seok Woo Lee* and Hon Zong Choi*

Key Words : FIB-Sputtering(집속이온빔 식각), FIB-CVD(집속이온빔 증착), Micro/Nano mold(마이크로/나노 금형), FIB Processing Technology(FIB가공공정기술), FIB Application(FIB 응용기술)

1. 서론

최근 마이크로가공기술이 진보되어 나노가공기술로의 도약이 지속되고 있으며, 이를 위해 기계가공 및 전기화학가공 기술 수준을 벗어나 이온빔을 이용한 마이크로가공 및 나노가공 기술에 대한 필요성이 대두되고 있다. 이러한 기술은 기존 머시닝 센터를 기반으로 진보되고 있는 초정밀가공기술과 MEMS를 기반으로 진보되고 있는 마이크로 가공 기술의 단점을 보완하여 3차원 미세가공이 가능하다는 장점이 있어 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서 연구가 활발히 진행되고 있으며, 국내에서도 현재 장비 개발이 연구되고 있는 상황이다. FIB 장비의 특징으로 마이크로 및 나노영역의 3차원 가공이 FIB-Sputtering 공정과 같이 재료를 제거하거나, 또는 FIB-CVD공정과 같이 재료를 쌓아 올리는 방식이 둘 다 가능하며, 또한 한 장비에서 동시에 이루어질 수 있다는 장점으로 인해 이를 활용한 다양한 분야에의 적용 연구가 진행되고 있다.¹ 특히, FIB-Sputtering에 대한 연구가 보다 활발히 이루어지고 있으며, FIB-CVD보다는 정밀한 가공형상을 얻을 수 있기 때문이다.

FIB의 이러한 다양한 분야의 활용연구가 국내외적으로 활발히 진행되고 있으나, 아직 가공 장비로서의 기능보다는 측정 검사 장치로서의 역할이 보다 큰 것이 현실이다. 따라서 미국, 일본, 유럽 및 국내의 연구자에 의해 가공장비로서의 기능에 대한 많은 제안이 나오고 있다. 하지만 FIB의 가장 큰 단점으로 낮은 생산성이 지적되고 있으며, 이를 극복할 수 있는 방안으로는 금형 제작을 통해 기존 대량생산 가공시스템을 활용하거나, 가스방식의 이온빔을 발생시켜 다중빔을 활용한 가공 또는 부품 가공시 기존의 기계가공 및 전기화학적 가공기술을 통한 1차 가공 후 미세보완가공을 수행하는 방법이 제안되고 있다.^{3,9}

FIB공정기술을 이용한 응용분야로는 직접 형상을 가공하거나 미세 금형관련 대상제품이 모두 가능하며, 대표적인 사례로 마이크로렌즈, AFM Tip, 나노회로 금형, DVD 금형, 바이오 칩 등이 있다. 현재까지는 대부분 2.5D의 형상이 주류를 이루나, 최근 3D 가공에 대한 보고가 활발해지고 있다.⁷ 본 논문은 이러한 FIB가공기술에 필요한 기본적인 공정기술의 소개와 더불어 현재 FIB가공공정기술의 동향과 사례를 소개하고 있으며, 본 논문을 통해 FIB공정기술을 연구하는 연구자에게 보다 효율적인 연구방향 설정에 도움이 되기를 바란다.

* 한국생산기술연구원 e가공공정팀

Tel. (032) 850-0309

E-mail : egkang@kitech.re.kr

2. FIB 공정기술 개요

2.1 FIB 공정기술 개요

FIB 가공공정기술의 장점은 단일 장비에서 Fig. 1과 같이 3가지의 기능이 동시에 운용이 가능하기 때문에 다양한 응용분야의 적용에 많은 장점을 가지고 있다는 것이다. 특히, 마이크로 부품 가공 시에 대한 효과가 배가될 것으로 판단된다.

각각 기능별 주요 응용분야로는 FIB-Sputtering의 경우 대부분 TEM 샘플제작과 반도체 칩 등의 분석용에 이용된다. 또한 FIB-CVD의 경우는 미세 칩 회로의 보정이나 보호막생성에 활용된다. 그밖에 Implantation의 경우는 매우 국부적인 곳의 표면 개질에 일부 이용되고 있으나 자주 이용되는 공정은 아니다.

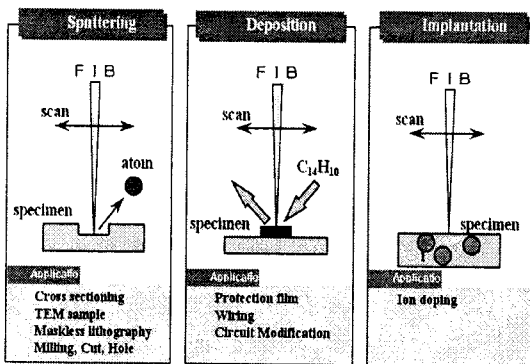


Fig. 1 Three Major Functions of FIB Technology

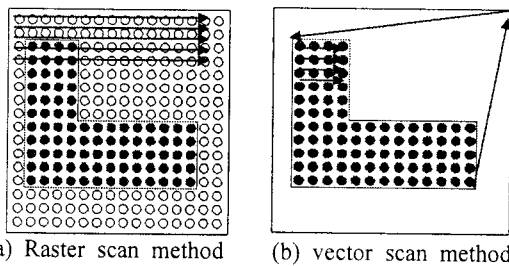


Fig. 2 Ion Beam Scanning Procedures

FIB의 가공은 집속된 이온빔을 원하는 패턴으로 스캐닝 함으로써 국부적인 가공이 이루어진다. 이때 주로 사용되는 집속이온빔 스캐닝 방법으로 Fig. 2와 같이 두 가지가 사용된다. Fig. 2(a)의 경우가 가장 많이 사용되는 방법이며 Raster scanning

method이다. 방식은 전자빔 스캐닝은 전 영역에 걸쳐서 진행되나 패턴이 형성될 부분의 위치를 선별하여 빔블랭커가 빔을 주사하거나 차단시키는 방식으로 패턴을 얻는다. 이는 집속이온빔을 통해 화상을 얻기 위한 방법과도 유사하나, 불필요한 많은 스캐닝으로 인해 가공 속도 면에서 불리할 수 있다. 따라서 Fig. 2(b)와 같은 vector scan 방식이 FIB 가공공정에 사용되는 추세이다. FIB 가공공정에 사용되는 주요 파라미터로는 Area Ion Dose ($No./cm^2$), Dwell Time (usec), Ion Beam Current (pA), Focused Ion Beam Diameter (nm), Overlap (%) 등이다. 이 밖에도 많은 파라미터가 존재하나, 위의 5개 정도가 자주 사용되는 파라미터로 고려된다. 이 중 Area Ion Dose는 단위면적당 이온량을 의미하며, FIB-Sputtering 또는 FIB-CVD의 수율예측에 중요한 변수이며, Ion Beam Current와 연계하여 가공 수율에 예측에 사용된다. 이 밖의 파라미터 또한 가공 정밀도와 수율에 영향을 미치며, 이에 대한 가공특성을 다음 장에 설명하고자 한다.

특히, FIB 가공공정상 면적당 이온주입량(area ion dose)의 계산은 Ion Beam Current와 Dwell Time 및 Area Step Size에 의해 계산되어질 수 있다($area\ ion\ dose = ion\ beam\ current \cdot area\ dwell\ time / area\ step\ size^2$). 그리고 빔의 스캐닝 속도(Beam Speed)는 Area Step Size와 Area Dwell Time에 의해 계산되어진다($beam\ speed = area\ step\ size / area\ dwell\ time$).

Fig. 3은 FIB가공공정(또는 장비)에서 중요하게 영향을 미치는 최소빔 분해능, 이온빔 입사각, 수차들과의 관계 그래프이다. 최소 빔직경(d_1) 및 수차들과의 관계식은 식(1-5)에 나타내져 있으며, Fig. 3 처럼 최소 빔직경(d_1)은 입사각(α_1)의 변화에 따라 최소값을 갖는 한 개의 입사각이 존재하는 것을 알 수 있다.

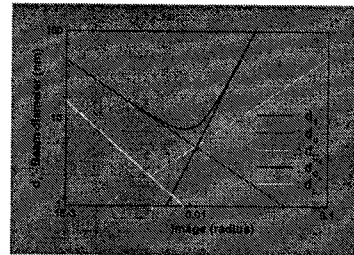


Fig. 3 Focused Ion Beam diameter with Incident Angle

최소빔 직경(d_1)에 관한 관계식은 식(1)과 같으며, 식(2-5)의 조합으로 구성된다.

$$d_1^2 = (Md_0)^2 + d_d^2 + d_{cs}^2 + d_{cc}^2 + d_t^2 \quad (1)$$

가속전압에 따른 집속이온빔 회절 직경(d_d): Diameter of the diffraction disk

$$d_d = 1.5 \lambda \alpha_1 \sqrt{V} \quad (2)$$

집속이온빔 전자기장 렌즈에 의한 구면수차 (dcs) : Spherical aberration disk

$$d_{cs} = 0.25 c_s \alpha_1^3 \quad (3)$$

집속이온빔 전자기장 렌즈에 의한 색수차 (dcc) : Chromatic aberration disk

$$d_{cc} = c_c \alpha_1 \Delta V / V \quad (4)$$

집속이온빔 경로 변화에 의한 오차: Trajectory displacement

$$d_t \cong 1.6 \times 10^{-6} (I / \alpha_1^2)^{2/3} \quad (5)$$

일반적인 나노가공공정은 Fig. 4와 같이 다양하며, 각각 장단점이 있으나 현재 반도체 공정에서는 대부분 Photolithography공정을 이용하고 있다. 이는 생산성(Production) 측면과 최소가공패턴(Minimum feature) 측면에서 다른 가공공정 프로세스보다 유리하기 때문에 판단된다. 이밖에 다양한 가공공정이 연구되고 있으며, 최소가공패턴(Minimum feature)에서는 이미 수 나노 수준에 까지 다다르고 있다. 특히, FIB의 경우 최소가공패턴이 수nm까지 가능하며, 임의의 3차원 형상까지 가공이 가능하여 그 응용범위가 확대될 것으로 기대되고 있다. 단점으로는 생산성이 떨어지며, 공정비용이 고가인 점을 들 수 있다. 따라서 이를 개선하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다.

3. FIB-Sputtering 공정기술

3.1 공정변수에 따른 FIB-Sputtering 특성

3.1.1 기본공정변수에 따른 가공특성: Tilt Angle, Dwell Time, Overlap

FIB-Sputtering 공정시 기본적인 공정변수는 Tilt Angle, Dwell Time, Overlap이며, 이에 따른 FIB-Sputtering의 가공수율 변화 특성을 분석하기 위해 Taguchi 방법을 이용한 특성 연구가 수행되었다.⁵ Table 1은 실험을 위해 사용되어진 3인자 4수준의

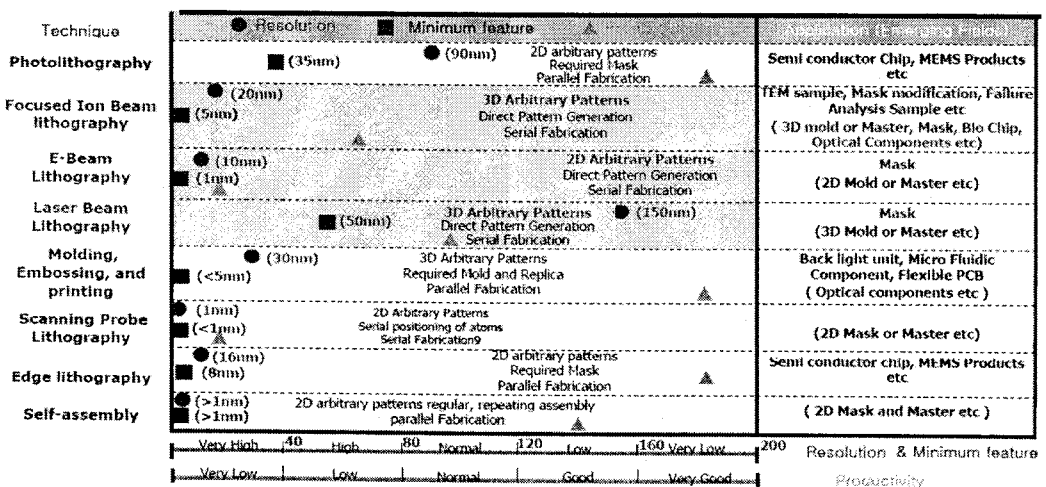


Fig. 4 Comparison of Nano Fabrication Processes

실험 조건을 나타내고 있다. 각각의 파라미터 수치는 일반적으로 많이 사용되는 수준으로 선정되었다. 사용되는 장비는 FEI Nova 2000 장비이다.

Table 1 FIB-Sputtering experimental conditions for Taguchi's method

Level Factors	1	Level 2	Level 3	Level 4	Level
Tilt angle (deg)	0	15	30	45	
Dwell Time (μsec)	0.375	2	4	6	
Overlap (%)	-30	-10	0	10	

실험 결과 FIB-Sputtering 공정상 Tilt Angle의 변화가 가공수율에 가장 영향을 크게 미치는 것으로 예측되고 있다. 상대적으로 Dwell time과 Overlap의 변화에는 FIB-Sputtering 수율의 변화가 크지 않음을 알 수 있다.

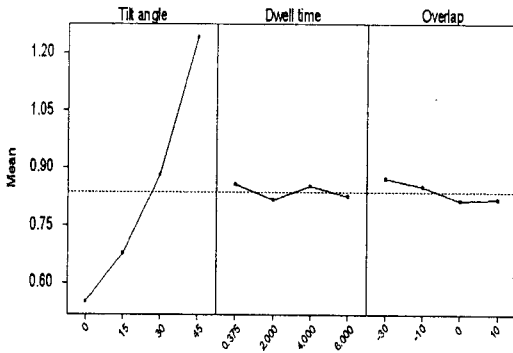


Fig. 5 Plot of mean value by Taguchi's method in FIB-Sputtering process

3.1.2 가속에너지에 따른 표면조도 특성 : Acceleration Voltage (keV)

FIB-Sputtering의 경우 FIB-CVD 공정보다 가공정밀도 등의 형상정밀도가 좋은 특성을 가지기 때문에 FIB 가공공정상 중요하게 받아들여지고 있다. FIB-Sputtering 공정시 TEM 샘플제작에 요구되는 가공면은 이온빔 입사각과 평행면이나 최근 FIB-Sputtering 공정을 이용한 마이크로 금형 및 미세채널가공 등의 응용에는 이온빔 입사각에 수직인 면의 표면조도가 중요하게 작용된다. 이를 위해 집

속이온빔의 가속전압에 따른 가공면의 표면조도를 분석한 연구가 진행되었으며,^{3,6,7} 가속전압이 클수록 가공깊이의 증가는 물론 표면조도 또한 작아지는 특성을 알 수 있다. 그러나 보다 좋은 표면조도를 위해 가속전압이 계속 상승할 경우 시편이 가공되기 보다는 이온빔이 시편에 침투하는 비율이 많아져 한계 값을 존재할 것이다.

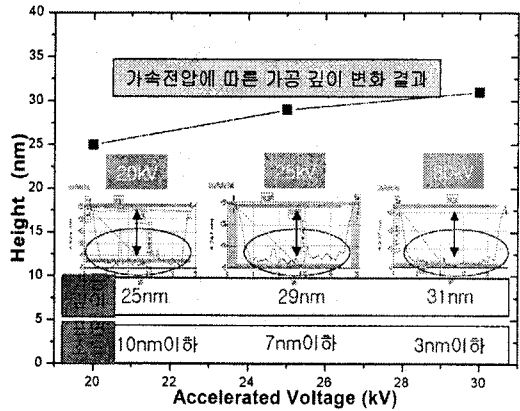


Fig. 6 Surface roughness and sputtered height variation according to acceleration energy

3.1.3 스캐닝 방법에 따른 특성 결과 : Scanning Procedure

FIB-Sputtering 가공공정시 고려해야 될 사항으로 재증착(redeposition) 현상이다. 재증착 현상은 FIB-Sputtering 공정에서 매우 다루기 까다로우며, 이를 해결하기 위해 보조가스를 사용하거나 하는 등의 시도가 가능하다. 그러나 근본적으로는 그 해결이 매우 까다로운 게 사실이다. Fig. 7은 2004년 Philipp M. Nellen에 의해 보고된 스캐닝 방법에 따른 FIB-Sputtering 후의 가공결과를 나타내고 있다. 각 그림 상단은 스캐닝 횟수를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 스캐닝 횟수가 줄어들수록 바닥면의 깊이가 차이가 심해짐을 알 수 있다. 또한 빔의 스캐닝 방향 뒤쪽에 항상 가공 깊이가 줄어들는 것을 확인할 수 있다. 따라서 재증착에 의한 영향을 줄이고 가공면의 정밀도를 증가시키기 위해서는 빔의 Dwell Time을 작게 만들어 줄 필요가 있으며, 필요에 따라 스캐닝 전략 또한 요구된다.

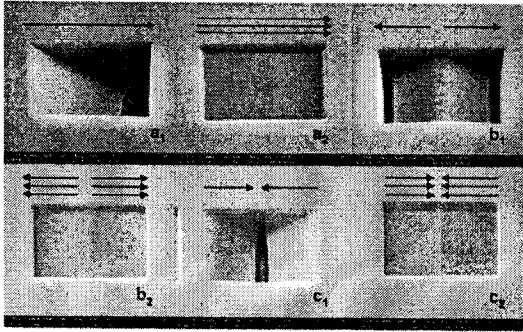


Fig. 7 Redeposition effect according to scanning procedure reported by Philipp M. Nellen(EFUG2004)

3.1.4 보조가스에 따른 특성 결과 : Assist Gas

FIB-Sputtering 공정의 경우 앞 절에서 설명한 것처럼 재증착(redeposition)에 의한 영향을 감소하기 위해 보조가스를 사용한다. Fig. 8의 경우 보조가스(I_2 , ZeF_2)의 사용 유무에 따른 가공특성을 나타내었다. 가공결과 보조가스를 사용하지 않았을 경우 재증착으로 인해 가공라인 주위가 불룩하게 올라와 있는 것을 확인할 수 있었다. 반면 보조가스를 사용할 경우는 가공라인 주위가 깨끗하게 가공된 것을 볼 수 있다. 따라서 가공수율 증가 측면이나 가공패턴 주위의 버의 발생억제 측면에서도 보조가스를 사용하는 편이 유리하나 소재에 따른 적정한 가스 선정의 어려움과 소재에 원하지 않은 물질에 오염될 수 있는 등의 단점 또한 존재한다.

3.2 FIB-Sputtering Rate 평가기술

FIB-Sputtering 공정은 TEM 시편의 응용 이외에 정밀 금형이나 마이크로 부품의 정밀 가공에까지 그 응용범위가 확대되고 있다. 특히, 정밀 마이크로 금형에 적용하기 위한 금형소재 선택에 따른 FIB-Sputtering 비율에 대한 평가를 실시하였다. 특히, STAVAX, GC, DLC 소재는 HOT EMBOSING 용 금형 또는 마스터를 제작하기 위해 선정되었다. FIB-Sputtering 비율을 평가하기 위해 단위면적당 이온주입량(area ion dose)을 일정하게 유지하였으며, 스캐닝 반복수(Number of Scan Layer)에 따른 가공 깊이 예측 결과를 선형회귀분석을 이용하여 계산하였다. Fig. 9의 계산결과와 같이 STAVAX가 가장 큰 FIB-Sputtering 비율로 평가되었으며, Si, GC,

DLC 순서로 FIB-Sputtering 비율이 작아짐을 알 수 있었다. 가공수율(FIB-Sputtering Rate)의 경우 가공 깊이의 예측을 통한 정밀 깊이가공에 활용이 가능하나, 가공시 발생하는 표면조도의 영향 또한 살펴볼 필요가 있을 것이다. 이는 다음절에 언급하고자 한다.

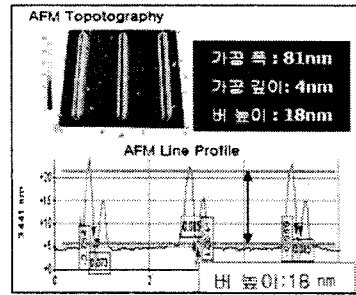


Fig. 8(a) FIB-sputtering result without assist gas

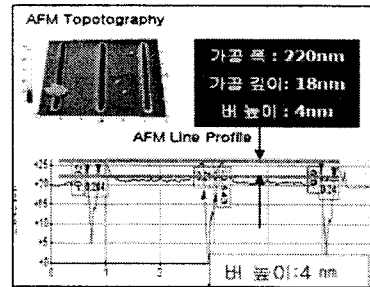


Fig. 8(b) FIB-sputtering result with assist gas

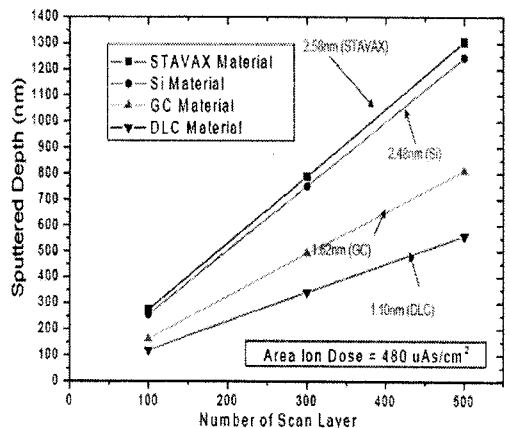
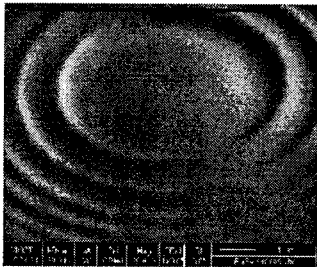


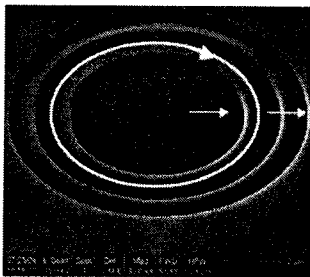
Fig. 9 FIB-Sputtering rate according to materials

3.3 FIB-Sputtering 3D 가공기술

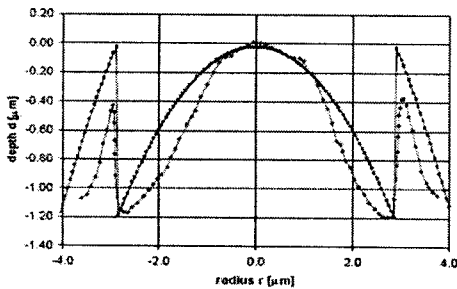
FIB-Sputtering을 위한 3D 가공기술에 대한 연구가 수행되어지고 있다. Nellen은 마이크로 Fresnel렌즈를 FIB-Sputtering 가공공정기술을 이용하여 3D가공을 수행하였으며, 1차적으로 FIB-Sputtering시 가공 깊이에 대한 패턴분석 연구를 수행 후 이를 활용하여 1차 예비가공을 수행하였다. 이후 사전실험 결과를 토대로 보정가공을 수행한 결과가 Fig. 10에 나타나있다. Fig. 10(c)(d)는 3D가공결과의 단면 프로파일이다. 연구결과 보정 후 Fig. 10(b)(d)의 결과에서 많은 개선효과가 있음을 알 수 있었다.



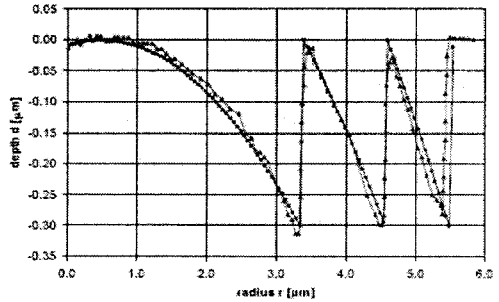
(a) First test result based on 3d model



(b) Modification test result



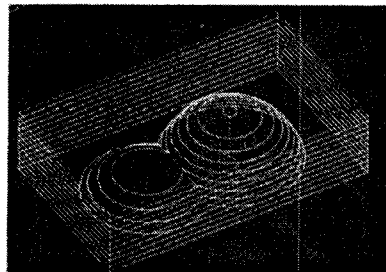
(c) Profile of first test result



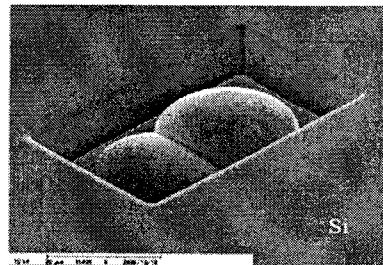
(d) Profile of modification test result

Fig. 10 3D FIB-Sputtering examples reported by Philipp M. Nellen (EFUG2004)

FIB-Sputtering 공정을 이용한 마이크로 3D 형상 가공 개발 모듈이 상용화 개념에서 시도되고 있다. Fig. 11(a)는 ELIONIX에서 개발되고 있는 3D CAD/CAM 개발 프로그램이며, 이를 활용한 구형상 가공결과가 Fig. 11(b)에 나타나있다. 구형상 직경은 20um정도이며, 향후 CAD/CAM을 이용한 다양한 3D 형상가공이 가능할 것으로 판단된다.



(a) 3D CAD/CAM Software for FIB-Sputtering



(b) 3D FIB-Sputtering result

Fig. 11 3D FIB-Sputtering examples reported by ELIONIX

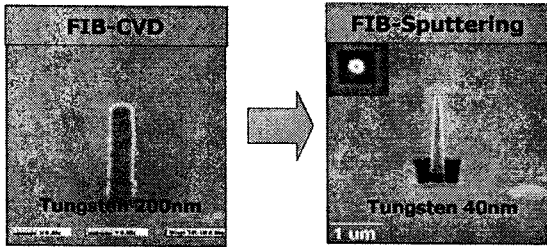


Fig. 12 AFM Tip Fabrication examples using FIB-CVD and FIB-Sputtering processes (www.fibics.com)

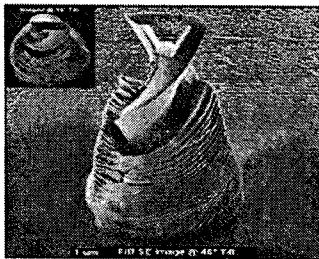


Fig. 13 Drill Bits Fabrication examples using FIB-CVD and FIB-Sputtering processes (www.fibics.com)

Fig. 12는 FIB-CVD 공정기술을 활용하여 Tungsten을 증착 시킨 후 3D FIB-Sputtering 공정기술을 이용하여 AFM Tip을 제작한 결과이다. (www.fibics.com) Fig. 13의 경우도 또한 FIB-CVD 공정 수행 후 3D FIB-Sputtering 공정기술을 통해서 가공된 Drill Bit 제작결과이다.(www.fibics.com)

4. FIB-Sputtering 응용기술

FIB-Sputtering 공정기술의 경우 FIB-CVD 공정 기술보다 정밀도가 비교적 우수하여 정밀가공 쪽에 활용이 되고 있으나, 작업영역이 수백um 이내이며, 생산성이 크지 않고, 액체소스(Ga)를 사용하여 공정비용이 크다는 단점을 지니고 있다. 따라서 다품종 소량 생산형 부품가공에 적합하며, 현재 실험실 수준의 시편가공 및 양산라인의 시편 검사 등에 주로 활용되고 있다. 그러나 FIB-Sputtering 공정기술의 활용을 극대화시키기 위한 연구가 진행되고 있으며, 특히, 마이크로/나노 금형가공에 대한 연구가 진행되고 있다.

FIB-Sputtering 공정기술을 마이크로/나노 금형가공에 적용하는데 있어서 표면조도는 매우 중요하

게 고려된다. 특히 형상이 작아질수록 금형 이형성 측면에서 매우 중요하게 고려된다. 따라서 금형 소재에 따른 FIB-Sputtering시 표면조도 특성에 대한 연구가 보고되어졌다.^{3,7,9} 표면조도특성의 경우DLC 소재와 GC 소재가 비교적 수nm 수준의 표면조도를 얻을 수 있었으며, Si Wafer의 경우도 10nm정도 수준의 표면조도가 가능하였다. 반면 STAVAX 소재의 경우는 수십nm이상의 표면조도를 얻을 수 있었다. 물론 이러한 표면조도는 마이크로 형상의 경우 Cut-off값에 따라 상대적일 수 있으나, 경도가 비교적 큰 재료일수록 표면조도가 커지는 특성을 보이며, 메탈 소재의 경우 재증착 특성이 크게 관찰되는 결과를 보이고 있다. Fig. 14는 HOT Embossing용 나노/마이크로 금형 가공을 목적으로 연구 수행된 FIB 가공후의 표면조도 결과이며, 고온에서 비교적 안정적인 STAVAX, GC, DLC 소재에 대한 연구가 진행되었다.

Fig. 15은 Ga⁺ 집속이온빔을 이용하여 hot embossing공정용 금형을 가공 후 성형에 사용시 발생할 수 있는 문제점으로 Ga의 오염에 대한 연구결과이다.¹⁰ Fig. 15(a)의 경우 Ga 이온의 오염을 줄이기 위해 1000°C 정도에서 아닐링을 수행 후 성형한 결과이며, 페턴주변에 Ga 오염으로 인한 형상의 찌그러짐이 확인되었으며, Fig. 15(b)의 경우 1400°C에서 아닐링을 수행 후 성형결과이며, 비교적 형상이 다시 깨끗하게 성형되는 것이 확인되었다. 이러한 현상은 1400°C의 아닐링시 Ga이온의 소재내부의 확산 또는 증발 등으로 예측해볼 수 있다.

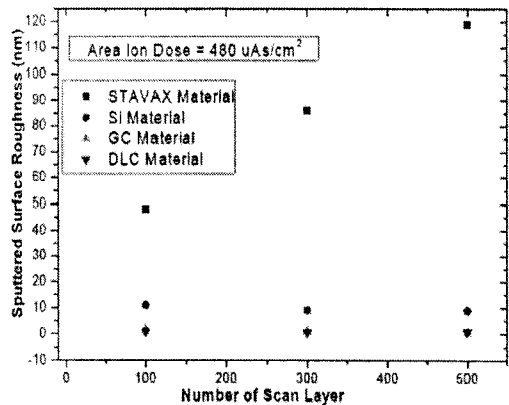
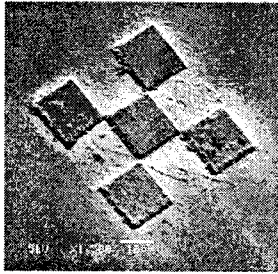
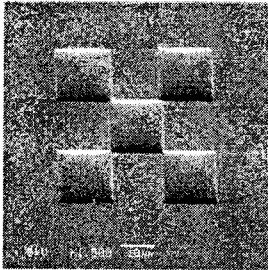


Fig. 14 Surface roughness results according to materials



(a) Annealing Temp. = 1000°



(b) Annealing Temp. = 1400°

Fig. 15 Photograph of hot embossing process results using micro mold by FIB-Sputtering process reported by Youn (AIST)

5. 결론

FIB 가공공정기술에 대한 기술 개요 및 공정기술을 소개하였으며, 주요 응용분야의 소개를 통해 관련연구자의 향후 연구방향 설정에 도움이 될 것으로 판단된다. FIB공정기술의 경우 FIB-CVD와 FIB-Sputtering 공정기술이 가능하나, FIB-Sputtering 공정이 보다 정밀도 면에서 우수하여 보다 많은 활용이 되고 있다. 따라서 FIB-Sputtering 공정기술을 중심으로 다음과 같은 결론을 내렸다.

첫째, FIB-Sputtering공정상 Tilt Angle의 변화가 가공수율에 가장 영향을 크게 미치는 것으로 예측되고 있다. 상대적으로 Dwell time과 Overlap의 변화에는 FIB-Sputtering 수율의 변화가 크지 않음을 알 수 있다.

둘째, 가속전압이 클수록 가공 깊이의 증가는 물론 표면조도 또한 좋아지는 특성을 알 수 있다.

셋째, 가공수율 증가 측면이나 가공패턴 주위의 버의 발생억제 측면에서도 보조가스를 사용하는 편이 유리하나 소재에 따른 적정한 가스 선정의 어려움과 소재에 원하지 않은 물질이 오염될 수 있는

등의 단점 또한 존재한다.

넷째, FIB-Sputtering 공정기술을 이용한 마이크로 3D 형상가공에 대한 연구가 활발해 지고 있으며, 3D CAD/CAM의 상용화 개발이 수행 중에 있어, 향후 CAD/CAM을 이용한 다양한 3D 형상가공이 가능할 것으로 판단된다.

다섯째, FIB-Sputtering 공정기술의 경우 작업영역이 수백um 이내이며, 생산성이 크지 않고, 액체소스(Ga)를 사용하여 공정비용이 크다는 단점을 지니고 있다. 따라서 다품종 소량 생산형 부품가공에 적합하며, 현재 실험실 수준의 시편가공 및 양산라인의 시편 검사 등에 주로 활용되고 있다.

여섯째, FIB-Sputtering 공정기술의 활용을 극대화시키기 위한 많은 연구가 진행되고 있으며, 특히, 마이크로/나노 금형 가공에 대한 연구와 더불어 가스이온을 이용한 다중빔을 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 차세대신기술개발사업 “고효율 에너지빔 응용 초미세 부품 제조용 In-line 시스템 개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Reyntjens, S. and Puers, R., “A review of focused ion beam applications in microsystem technology,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 11, Issue 4, pp. 287-300, 2001.
2. Choi, H. Z., Kang, E. G., Lee, S. W. and Hong, W. P., “Development of Nano Machining Technology using Focused Ion Beam,” *The Korean Society of Machine Tool Engineers Spring Conference*, pp.482-486, 2004.
3. Kang, E. G., Choi, B. Y., Hong, W. P., Lee, S. W. and Choi, H. Z., “Nano-Patterning Characteristics using FIB-Sputtering Technology for DVD Mold,” *J. of the KITECH*, Vol. 16, No. 7, pp.158-169, 2007.
4. Choi, H. Z., Hong, W. P., Kang, E. G., Choi, B. Y. and Lee, S. W., “Analysis on FIB-Sputtering

- Process using Taguchi Method,” Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol.15, No.6, pp.72-75, 2006.
5. Lee, S. W., Kang, E. G., Choi, B. Y., Hong, W. P. and Choi, H. Z., “Analysis of FIB-Sputtering Characteristics on Glassy Carbon,” Korean Society for Precision Engineering Spring Conference, pp.767-768, 2007.
 6. Youn, S. W., Takahashi, M., Goto, H. and Maeda, R., “Fabrication of micro-mold for glass embossing using focused ion beam, femto-second laser, excimer laser and dicing techniques,” Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187-188, pp.326-330, 2007.
 7. Youn, S. W., Takahashi, M., Goto, H. and Maeda, R., “Microstructuring of glassy carbon mold for glass embossing - Comparison of focused ion beam, nano/femtosecond-pulsed laser and mechanical machining,” Microelectronic Engineering, Vol. 83, pp.2482-2492, 2006.
 8. Watanabe, K., Morita, T. and Kometani, R., “Nanoimprint using three-dimensional microlens mold made by focused-ion-beam chemical vapor deposition,” J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 22, No. 1, pp.22-26, 2004.
 9. Kang, E. G., Lee, S. W., Choi, H. Z. and Hong, W. P., “Micro Mold Fabrication Process by Focused Ion Beam using Amorphous Materials,” Korea Patent Pending, No. 10-2007-0035048, 2007.
 10. Takahashi, M., “Micro/Nano Hot Embossing of Quartz Glass Materials with Glassy Carbon Mold Prepared by Focused Ion Beam,” The KITECH-AIST Joint Workshop on Micro/Nano Fabrication Technology, pp.19-44, 2007.