한국공작기계학회논문집 Vol.15 No.6 2006. 12.
Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers

집속이온빔의 전류변화에 따른 미세가공 특성분석

강은구*, 최병열+, 홍원표+, 이석우+, 최헌종+

(논문접수일 2006. 7. 14, 심사완료일 2006. 9. 4)

FIB Machining Characteristic Analysis according to Ga^+ Ion Beam Current

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

Abstract

FIB equipment can perform sputtering and chemical vapor deposition simultaneously. It is very advantageously used to fabricate a micro structure part having 3D shape because the minimum beam size of Φ10nm and smaller is available. Since general FIB uses very short wavelength and extremely high energy, it can directly make a micro structure less than 1μm. As a result, FIB has been probability in manufacturing high performance micro devices and high precision micro structures. Until now, FIB has been commonly used as a very powerful tool in the semiconductor industry. It is mainly used for mask repair, device correction, failure analysis, IC error correction, etc. In this paper FIB-Sputtering and FIB-CVD characteristic analysis were carried out according to Ga^+ ion beam current that is very important parameter for minimizing the pattern size and maximizing the yield. Also, for FIB-Sputtering burr caused by redeposition of the substrate characteristic analysis was carried out.

Key Words : FIB-CVD(집속이온빔 화학적증착), FIB-Sputtering(집속이온빔 스퍼터링), Ion Beam Current Characteristic(빔 전류 특성), Burr(버)

1. 서 론

최근 마이크로가공기술이 진보되어 나노가공기술로의 도약이 지속되고 있으며, 이를 위해 기계가공 및 전기가공 기술 수준을 벗어나 이온빔을 이용한 마이크로가공 및 나노가공 기술에 대한 필요성이 대두되고 있다. 이러한 기술은 기존 머시닝센터를 기반으로 진보되고 있는 마크로 가공기술과 MEMS를 기반으로 진보되고 있는 마이크로 가공 기술의 단점을 보완하여 3차원 미세가공이 가능하다는 장점이 있어 미국, 일본, 유럽 등 선진국에서 연구를 주도하고 있으며,

* 한국생산기술연구원 (egkang@kitech.re.kr)
주소: 406-130 인천광역시 연수구 동춘동 994-32
+ 한국생산기술연구원 e가공공정팀

국내에서도 현재 일부 장비 개발이 시도되고 있다[1].

FIB(Focused Ion Beam, 집속이온빔) 장비의 경우 이러한 마이크로 및 나노영역의 3차원 가공이 FIB-Sputtering 공정과 같이 재료를 제거하거나, 또는 FIB-CVD(Focused Ion Beam - Chemical Vapor Deposition, 집속이온빔 화학적 증착)를 통해 재료를 쌓아 올리는 방식으로 가능하다. 또한 이러한 기능이 한 장비에서 동시에 이루어질 수 있다는 장점으로 인해 이를 활용한 다양한 분야에의 적용 연구가 진행되고 있다.

특히, FIB-CVD의 경우 반도체 분야에서 포토 마스크나 집적화된 회로를 교정하는데 매우 효과적으로 이용되고 있으며, 일부 다양한 3차원의 부품을 직접 가공하는 사례의 연구가 발표되고 있다[2~4].

FIB-Sputtering의 경우는 다양한 3차원의 제품을 직접 제작하기보다는 생산성 및 정밀도 면에서 FIB-CVD 보다 우월함에 기인하여 3차원의 금형 가공 및 정밀한 마이크로의 공구 가공 등이 시도되고 있다[5,6].

이에 본 논문에서는 FIB-Sputtering 및 FIB-CVD를 이용한 미세패턴 가공을 위해 공정에 매우 큰 영향인자로 여겨지는 전류에 따른 가공 특성 분석을 수행하였고, 이를 통해 향후 2차원 또는 3차원의 미세 가공을 수행하기 위한 기반기술로서 활용하고자 하였다.

2. 실험장치 및 측정장비

Fig. 1은 본 연구에 사용된 FIB 장비로 SII Nano-technology사의 SMI 2050이다. FIB 장치의 주요 사양으로 두 개의 빔 렌즈(CL Lens, OL Lens)가 사용되며, 진공도는 이온챔버와 메인챔버 각각 1×10^{-5}pa, 8 $\times10^{-5}$pa 정도로 유지되고 있다. 이온 소스로는 Ga^{+} 액체 금속 이온원을 이용하며, 가속전압은 30keV이다. 최대 배율은 ×250,000이 가능하며, 최소 빔 분해능은 5nm정도이다. FIB-CVD에 사용되는 증착가스는 $C_{14}H_{10}$(Phenanthrene)과 $W(CO)_6$(Hexacarbonyl)의 두 종류가 가능하며, 본 연구에서는 $C_{14}H_{10}$을 사용되었다.

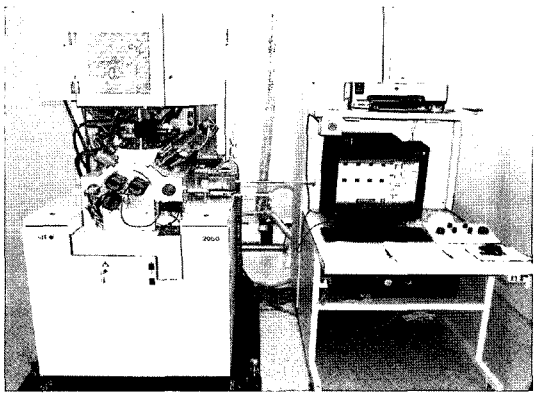

Fig. 1 FIB Photograph made by SII Nanotechnology Inc.(Model : SIM2050)

측정장비로는 PSIA사의 XE-100 모델 AFM을 이용하였다. 측정범위는 수평방향으로 최대 100×100㎛, 수직 방향으로는 12㎛이다. 측정 분해능은 수평방향으로 0.15㎚이며, 수직방향으로 0.05㎚이다.

3. FIB-CVD 미세패턴 실험 및 고찰

라인패턴 FIB-CVD 실험은 얻을 수 있는 최소 선폭 및 이온빔 전류밀도(current density)와 패턴 크기의 변화에 따른 증착 특성을 분석하기 위하여 수행하였다.

Table 1은 라인패턴 실험조건이다. FIB-CVD 라인패턴 실험변수는 이온빔 전류량(Ion Beam Current)과 패턴 폭이다. 실험변수로 사용된 전류량은 각각 8, 48, 1318 pA이며, 폭은 30㎚, 100㎚, 200㎚, 500㎚, 1㎛의 변화에 따라 실험을 실시하였다. 이온빔 전류량은 단위시간당 주입되는 이온수를 의미하나 이때 단위면적당 주입량 또한 고려가 필요하다. 각각의 전류량일 때 빔 직경은 13, 23, 100㎚이며, 이때의 이온빔 전류밀도는 각각 0.06(8pico), 0.116(48pico), 0.168(1318pico) pico Ampere/nm2이다. Fig. 2, 3은 FIB-CVD 라인패턴 실험결과이며, 실험결과의 측정은 SEM이미

Table 1 Experimental Conditions

Dwell Time	0.375μsec
Tilt Angle	0 degree
Ion Dose	222.222×10^{15} No./cm^2
Substrate	Si Wafer
Over. Lap	0 %
Pattern Shape	Rectangular(Length=5㎛)
Pattern Width	30nm, 100nm, 200nm, 500nm, 1㎛
Ion Beam urrent	8, 48, 1318 pico Amp.
Beam Size	Φ13nm, Φ48nm, Φ1318nm
Ion Beam Density	0.06, 0.116, 0.168 pico Ampere/nm^2

지와 AFM을 이용하였다.

이온빔 전류량의 변화에 따른 분석결과 8pA일 경우 비교적 CVD가 잘 증착되었으나, 1318pA의 경우 CVD 형상이 관찰되지 않고 오히려 Sputtering이 발생되는 것이 이미지상 관찰되었다. 이는 Dubner[6] 이론에 입각하여 이온빔 전류량이 클 경우 단위 면적당 이온빔 밀도도 상대적으로 크기 때문에 precursor의 반응에 의한 CVD Yield 보다 Ga^+이온에 의한 Sputtering Yield가 상대적으로 많아진 이유로 판단된다. 이에 따라 증착이 이루어지지 못하고, Sputtering 이 발생하는 현상이 실험 결과에서 나타나고 있다. 이러한 결과는 AFM 3차원 형상 측정결과 및 2차원 단면 측정결과를 통해서도 확인이 가능하였으며, 정량적으로 수십nm 정도의 sputtering 결과를 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 라인패턴 FIB-CVD 패턴의 폭 및 높이에 대한 정량적인 측정결과를 나타내고 있다. 실험 결과 최소 패턴 폭은 전류량 48pA일 경우 1.1㎛ 정도를 얻을 수 있었다. 또한 실제 지령패턴 폭에 비해 1㎛ 정도의 오차가 일정하게 발생함을 확인할 수 있었다. 이는 화학적 증착과정에서 빔 주사 영역이외의 영향력 부분을 나타내는 것으로 비교적 선형성을 보이고 있기 때문에 이를 통한 패턴폭의 예측에 비교적 수월하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 4 (b)는 라인패턴 FIB-CVD의 패턴 높이에 대한 실험결과이다. 실험조건에서 패턴상의 단위 면적당 일정한 Ion Dose량 (22.222×10^{15})이 주입되었기 때문에 실제 일정한 CVD 패턴의 높이가 기대되었으나, 측정결과 이온빔 전류량과 패턴

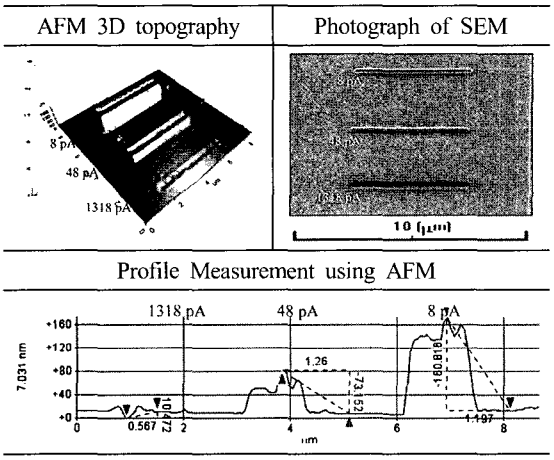

Fig. 2 Result of line pattern of 30nm width with respect to ion beam current

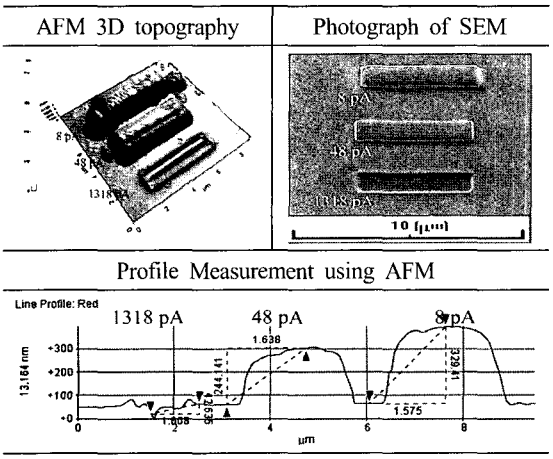

Fig. 3 Result of line pattern of 1㎛ width with respect to ion beam current

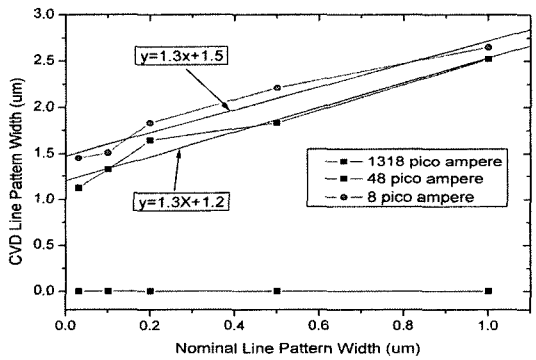

Fig. 4 (a) AFM results of the width of CVD line pattern

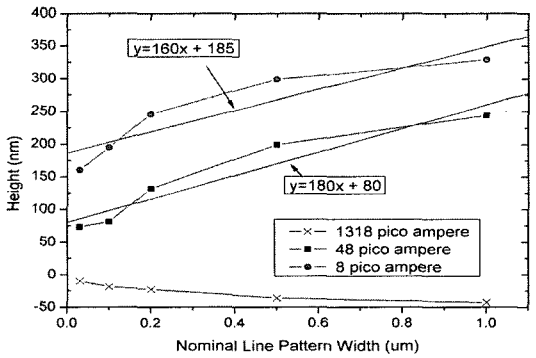

Fig. 4 (b) AFM results of the height of CVD line pattern

폭의 변화에 따라 패턴 높이의 변화가 발생됨을 알 수 있었다. 결과적으로 이온빔 전류량이 작고 패턴 폭이 클수록 높이 증착률이 증가되는 경향을 보였다. 측정결과 최대 CVD 수율은 전류량 8pA와 1.0㎛일 때 패턴 폭 높이가 400nm를 얻을 수 있었다.

이온빔 전류량이 작을수록 패턴 수율이 증가되는 이유는 이온빔 전류밀도가 작기 때문에 증착과정에서 발생되는 Sputtering의 양이 상대적으로 작기 때문인 것으로 판단된다. 또한 이온빔 에너지와 이온빔 전류밀도와의 적정한 분석에 의한 최적조건이 있을 수 있으나, 본 FIB 시스템의 특성상 이온빔 에너지가 30keV로 제한적이다.

그리고, 지령 패턴 폭이 증가될 경우 증착 수율(증착 높이)이 증가되는 현상을 관찰 할 수 있었으며, 이는 증착 메카니즘에서 precursor와 시편과의 정전기적인 영향이 면적이 클 경우 보다 큰 인력으로 작용되어 보다 많은 증착이 발생되기 때문인 것으로 판단되어진다.

따라서 미세패턴제작에 적용하기 위해서는 FIB-CVD 패턴 형상에 영향을 미치는 인자에 대한 보다 많은 정보의 DB화가 요구되며, 이온빔 전류량의 특성 및 빔 주사영역에 의한 선형적인 패턴 형상 특성을 얻었으며, 향후 FIB-CVD 형상 예측 기술에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

4. FIB-Sputtering 미세패턴 실험 및 고찰

라인패턴 FIB-Sputtering 실험은 얻을 수 있는 최소 선폭 및 이온빔 전류밀도와 패턴 크기의 변화에 따른 폭, 높이, Burr의 Sputtering 특성 분석을 위하여 실시하였다. 실험조건은 Table 1과 동일하게 하였다.

Fig. 5, 6은 FIB-Sputtering 실험결과이다. 이온빔 전류량의 변화에 따른 분석결과 전류량이 8pA일 때 1318pA일 경우보다 큰 크기의 버가 발생함을 관찰할 수 있었다. 따라서 30nm 폭의 가공 결과인 Fig. 5의 결과보다 1㎛ 폭의 가공결과인 Fig. 6의 결과에서 보다 버의 차이가 명확히 관찰 할 수 있었다.

Fig. 7의 경우는 AFM 측정 결과를 패턴의 2차원 단면의 높이, 폭, 버의 크기로 표현한 그래프이다. Fig. 7 (a)는 가공폭과 전류에 대한 가공 깊이의 변화를 나타내고 있다. 실험결과 가공 폭이 증가할수록 가공 깊이가 증가함을 확인하였다. 이는 단위 면적당 ion dose량이 동일하기 때문에 동일한 가공깊이가 될 것으로 판단되나, 패턴폭이 작을 경우 재증착이 보다 많이 발생하기 때문에 깊이가 줄어든 것으로 판단된다. 또한 전류량 1318pA일 경우 패턴 깊이가 증가하는 특징을 보였다.

Fig. 7 (b)는 지령 패턴폭과 실제 가공되는 패턴 폭의 변화를 나타낸 것으로, 경향은 가공 깊이와 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig. 7 (c)는 지령 패턴 폭 및 전류에 따른 버의 크기를 나타내고 있으며, 전류가 작고 지령 패턴 폭이 작을수록 버의 크기가 감소되는 경향을 확인할 수 있었다.

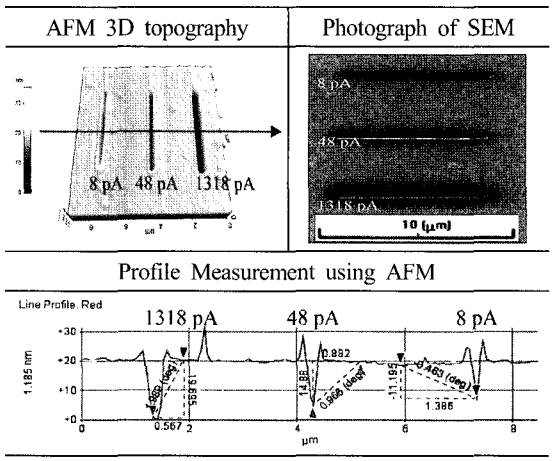

Fig. 5 Result of line pattern of 30nm width with respect to ion beam current

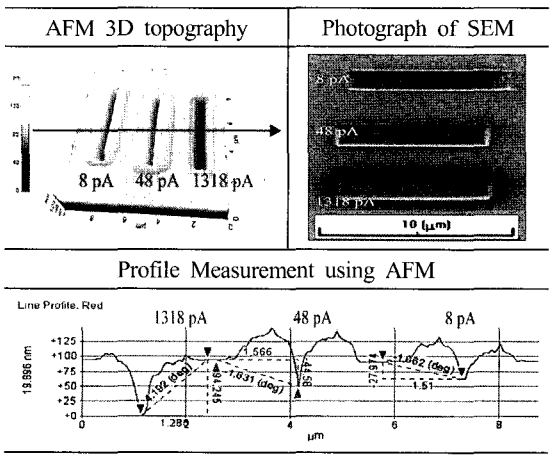

Fig. 6 Result of line pattern of 1㎛ width with respect to ion beam current(1318 pico amp.)

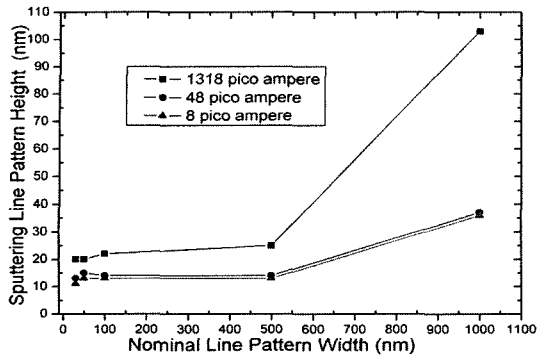

Fig. 7 (a) AFM results of the height of sputtering line pattern

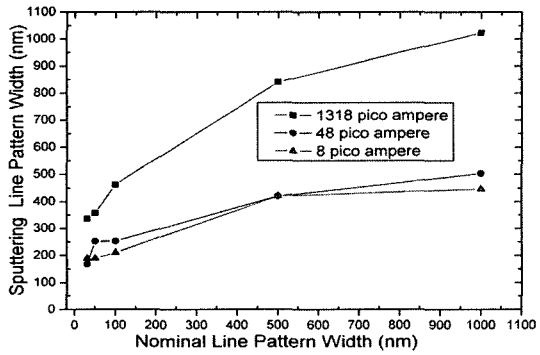

Fig. 7 (b) AFM results of the width of sputtering line pattern

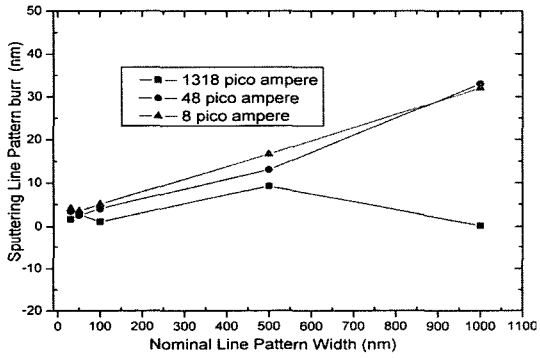

Fig. 7 (c) AFM results of the burr of sputtering line pattern

5. 결 론

본 연구는 FIB-Sputtering 및 FIB-CVD의 미세 패턴 가공을 위해 공정에 매우 큰 영향인자인 이온빔 전류량과 주사 면적 조건에 따라 가공 특성분석을 실시하였으며, 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) FIB-CVD 공정의 경우 이온빔 전류량이 작을수록 패턴의 증착률이 우수한 것을 확인할 수 있었으며, 이는 Ga^+ 이온량이 많을 경우 Ga^+이온을 통한 Sputtering 현상이 발생되기 때문인 것으로 판단된다.

(2) 증착 패턴이 넓을수록 증착높이가 증가되는 것을 확인할 수 있었으며, 이에 관한 메카니즘적 분석이 향후 필요할 것으로 판단되다.

(3) FIB-Sputtering 공정시 Ga^+ 이온량이 작을수록 버의 크기가 커짐을 확인할 수 있었으며, 또한 지령 패턴폭이 작을수록 버의 크기가 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

(4) 이는 재증착과 연관성이 있을 것으로 예상되며, 패턴 폭이 작을수록 제거된 재료가 재증착될 확률이 증가함에 의한 것으로 판단된다. 그러나 이온빔 전류량이 작을 경우에도 재증착될 확률이 커지는 것으로 예상되나 이에 대한 명확한 메카니즘적 분석이 향후 요구된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 차세대신기술개발사업 "디지털 인쇄 기법을 이용한 광전소자의 직접제작 기술 개발" 과제의 연구비를 지원받아 수행되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Greger, T. and Stefan, J., 1998, "Microprocessing at the fingertips," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 8, pp. 251~262.

(2) Patricia, G. B., 1995, "High resolution x-ray mask repair," *J. Vac. Sci. Technol.*, B13(6), Nov/Dec, pp. 3070~3074.

(3) Morita T, Watanabe K, Kometani R, Kanda K, Haruyama Y, Kaito T, Fujita JI, Ishida M, Ochiai Y, Tajima T, Matsui S, 2002, "Three-Dimensional Nanoimprint Mold Fabrication by Focused-Ion-Beam Chemical Vapor Deposition," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 41, pp. 4425~4426.

(4) Reo, K., Takayuki, H., Kazuhiro, K., Yuichi, H., Takashi, K., Jun-ichi, F., Masahiko, I., Yukinori, O. and Shinji, M., 2005, "Three-dimensional high-performance nano-tools fabricated using focused-ion-beam

chemical-vapor-deposition," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, B232, pp. 362~366.

(5) Watanabe, K, Morita, T. and Kometani, R., 2004, "Nanoimprint using three-dimensional microlens mold made by focused-ion-beam chemical vapor deposition," *J. Vac. Sci. Technol.*, B22(1), pp. 22~26.

(6) Dubner, A. D., 1990, "Mechanism of Ion Beam Induced Deposition," *Doctoral Thesis*, Massachusetts Institute of Technology.

(7) Choi, H. Z., Kang, E. G., Lee, S. W. and Hong, W. P., 2004, "Development of Nano Machining Technology using Focused Ion Beam," *Proceedings of the KSMTE Spring Conference*, pp. 482~486.