

집속 이온빔 가공변수에 따른 Au 에칭 특성 연구

박진주⁺, 김성동^{*}

(논문접수일 2007. 6. 20, 심사완료일 2007. 8. 17)

The ocused Ion Beam Etching Characteristic of Au

J.J. Park⁺, S.D. Kim^{*}

Abstract

Focused Ion Beam(FIB) systems is a useful tool for the fabrication of micro-nano scale structures. In this study, the effects of FIB etching on the Au microstructure are systematically investigated. As the fabrication parameters, ion dose, dwell time and beam overlap ratio are studied. First, the increases of Ga ion dose makes the milling yield higher and the sidewall of milling profile steeper. Dwell time is found to have little effects on the milling profile due to the relatively large milling area of $1 \times 1\mu\text{m}^2$ used in this study. However, beam overlap significantly affects not only milling rate but also milling profile. As the beam overlap ratio changes from positive to negative, the development of regular cross-stripe patterns at the bottom with low milling rate is observed.

Key Words : Micro-nano fabrication technique(마이크로-나노 가공기술), FIB(집속이온빔), Lithography(리소그래피), Milling(밀링), Au(금), Milling yield(밀링수율), Dwell Time(드웰타임), OverLap(오버랩)

1. 서론

최근 나노기술의 발달로 인해 마이크로-나노 가공 기술의 중요성이 강조되고 있다. 포토 리소그래피(Photo Lithography, PL), 전자빔 리소그래피(Electron Beam Lithography, EBL), 집속 이온빔(Focused Ion Beam, FIB)⁽¹⁾은 마이크로-나노 크기의 가공을 위한 중요한 수단으로 이용되고 있으며⁽²⁻⁴⁾. 특히 집속 이온빔 밀링은 마스크가 필요 없는 리소그래피

기술로 소자 가공, 투과전자현미경(TEM)시편 준비⁽⁵⁾, 자 구조립 등 다양한 분야에서 응용되고 있다. 집속이온빔을 이용한 나노 소자 제작의 경우 Si 등 다양한 재료가 사용되고 있는데, 이 가운데 Au의 경우 최근Au 금속판에 기어, 바퀴 등 다양한 형태의 나노 크기 모형 제작에 성공하였고⁽⁶⁾, 도판관의 조리개로서 Au 금속판을 사용하는 나노 크기의 C 모양 조리개 제작에 성공하는 등 마이크로-나노 소자 제작에 유용하게 쓰이고 있는 물질이다⁽⁶⁾.

⁺ 서울산업대학교 나노생산기술연구소

^{*} 교신저자, 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 (sdkim@snut.ac.kr)

주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172번지 서울산업대학교 다산관 109호

본 연구에서는 이온빔 스퍼터링 공정의 하나인 FIB 밀링을 이용하여 Au에 패턴을 제작하기 위해 FIB 공정 변수를 파악하고, 공정변수 변화에 따른 밀링가공특성을 파악하고자 한다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 SII Nano Technology사의 FIB(SMI3050)를 사용하였으며, 이온소스는 Ga 이었다.

FIB 공정 변수에 따른 Au 밀링 특성을 살펴보기 위해 이온주입량(dose), 드웰타임(dwel Time), 오버랩(overlap)을 변화시켜 가며 Au 밀링 형상을 관찰하였다. 가공형상은 $1 \times 1\mu\text{m}^2$ 의 정사각형이었으며, 가속전압은 30kV, 10pA로 고정하였다. 이때 빔 직경은 약 14nm로, 본 실험에서 사용한 F.O.V(Field of view) 12 μm 에 대해 전체 800 × 800pixel 이미지의 1pixel 간격(약 15nm)과 거의 흡사한 크기이다.

가공에 사용한 시편은 두께가 약 500 μm 의 Pyrex 기판에 Au를 Sputter방식으로 280nm증착하였으며 Pyrex와 Au의 접착성을 높이기 위해 5nm Cr층을 사잇층으로 사용하였다. 사용한 시편 및 실험 장치에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

주입한 이온량에 따른 Au 가공특성을 관찰하기 위해 Dose량을 10^{16} ions/cm², 3×10^{16} ions/cm², 5×10^{16} ions/cm², 10^{17} ions/cm², 3×10^{17} ions/cm²으로 변화시켰으며, 이때 빔의 입사각은 수직, 드웰타임은 300 μs , 스캔방식은 Normal 모드로 고정하였다.

패턴 가공에 대한 드웰타임의 영향을 알아보기 위해 이온주입량을 3×10^{16} ions/cm²로 일정하게 유지하고, 드웰타임을 0.375 μs , 10 μs , 50 μs , 100 μs , 200 μs , 300 μs , 500 μs ,

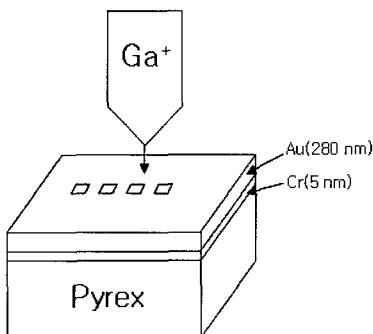


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

1000 μs 로 변화시켰다.

패턴가공에 대한 오버랩의 영향을 알아보기 위해 다른 조건은 동일하게 유지하고 스캔방식을 Overlap 모드로 하여 -800%에서 0% 음수의 오버랩, 0%에서 30%, 60%, 90% 양수의 오버랩 가공을 하였다. 각 오버랩 값에 따른 빔의 조사 범위를 Fig. 2에 나타내었다. 가공된 패턴은 AFM(Atomic Force Microscope, DI3100)으로 측정하였으며, Au의 무른 특성상 tapping 모드를 사용하였고, 스캔사이즈는 $3 \times 3\mu\text{m}^2$ 로 하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 Dose량에 따른 Au 밀링

Fig. 3 (a)에 도즈량에 따른 Au 밀링일드 특성 변화를 나타내었다. 도즈량이 증가함에 따라 밀링일드는 증가하다 감소하는 경향을 나타내었다. 일반적으로 도즈량이 증가하면 밀링일드가 증가하는 경향을 나타내지만 도즈량이 10^{17} ions/cm²이 상인 조건에서는 패턴이 300nm 이상 깊이로 가공되어 Au 층(280nm)만 아니라 Cr 사잇층(5nm)과 Pyrex까지 밀링된 것으로 보인다.

그런데 Pyrex의 밀링일드는 Au 밀링일드보다 낮기 때문에 도즈량 10^{17} ions/cm² 이상에서 밀링일드가 감소하게 된 것으로 보인다. 이는 Fig. 3 (b)에 나타난 도즈량에 따른 Au의 가공 깊이 측정에 의해 확인할 수 있는데, 도즈량이 증가함에 따라서 가공 깊이가 계속 증가하는 경향을 나타내었다.

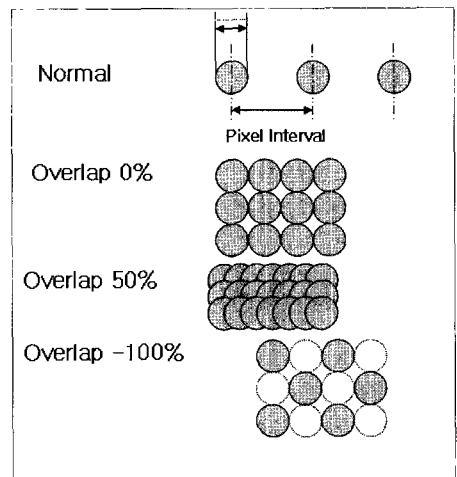


Fig. 2 Definition of overlap

그러나 280nm 근처에서 기울기가 변화하는데, 이는 앞서 설명한 바와 같이 Cr 및 Pyrex가 가공되기 시작하기 때문이다. 이러한 결과를 바탕으로 드웰타임과 오버랩에 따른 Au 밀링 가공은 도즈량 3×10^{16} ions/cm²으로 진행하였다. 다음

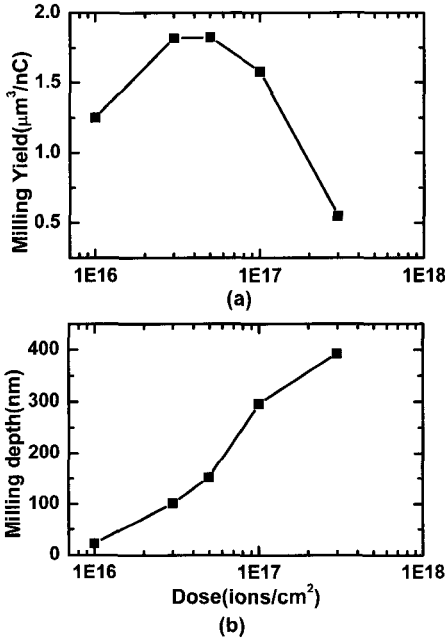


Fig. 3 (a) Au milling yield and (b) milling depth as a function of dose. The sample was Pyrex/Cr 5/Au 280(nm) and beam condition was 30kV, 10pA.

으로 Fig. 4는 도즈량의 변화에 따른 벽면(sidewall)의 각도와 패턴의 가장자리에서 돌출 영역의 높이를 살펴본 그림이다. 벽면의 각도와 돌출 영역의 높이 모두 도즈량이 증가함에 따라서 증가하는 경향을 보였다.

이와 같은 결과는 Au가 가공되는 동안에 스퍼터링된 물질이 다시 가공 영역에 증착되는 현상(redeposition)에 의한 것으로 보인다⁽⁷⁾.

3.2 드웰타임에 따른 Au 밀링

드웰타임은 각 픽셀 당 빔이 머물러 있는 시간이다. 즉, 가공영역을 한번 스캔하는 경우라면 드웰타임이 증가할수록 이온빔이 조사되는 시간이 증가하여 더 깊은 가공깊이를 가지게 된다.

하지만, 일반적으로는 빔의 전류량을 고정시킨 상태에서 도즈량을 변화시켜 가공깊이를 조절하는 방법을 사용하고 있으며, 이 경우 도즈량과 빔 전류량, 가공시간의 관계를 식 (1)에 나타내었다.

$$Dose = \frac{I_{ion} \times t_{exposure}}{A_{pattern} \times 1.602 \times 10^{-15}} \quad (7)$$

이때 I는 빔의 전류량, t는 가공 시간, A는 가공 면적이다. 일정한 전류, 일정한 도즈량, 일정한 크기로 가공하였을 경우 패턴의 전체 가공시간은 같다. 이 경우, 빔이 각 점에 머무르는 드웰타임이 길어지면 전체 영역이 스캔되는 횟수는 감소하고 반대로 드웰타임이 짧아지면 스캔되는 횟수가 증가하여 동일한 양의 이온이 가공 영역에 조사되는 것이다. 즉, 드웰타임에 따라서 주사 횟수 만 결정될 뿐 조사되는 이

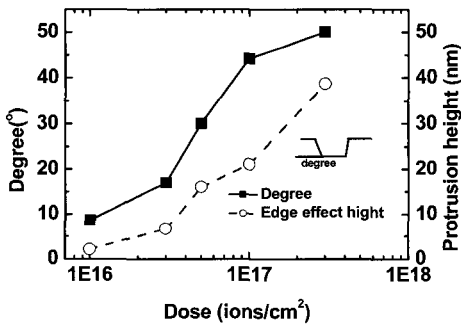


Fig. 4 Sidewall degree and average height(nm) of protrusions at the edge of patterned structures as a function of dose

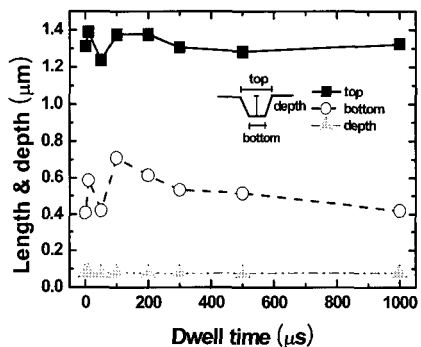


Fig. 5 Au milling length and depth as a function of dwell Time

은량은 같다는 것을 의미한다.

Fig. 5는 드웰타임에 따른 가공된 결과를 나타낸 그림이다. 가공된 면의 윗면과 아랫면의 길이와 가공된 깊이를 AFM으로 측정된 결과로 다른 조건의 드웰타임임에도 불구하고 가공면적의 차이도 비슷하고, Au가 가공된 깊이 역시 앞서 설명한 바와 같이 비슷한 경향을 보이고 있다. Sigle Pixel 가공의 경우 드웰타임이 증가할수록 스캔되는 횟수가 줄어들기 때문에 가공되는 모서리가 두렷한 모양을 나타낸다⁽⁸⁾. 하지만 $1 \times 1\mu\text{m}^2$ 패턴가공은 15nm정도 되는 pixel이 60 개 정도 겹쳐져서 가공되기 때문에 드웰타임이 증가하여도 패턴 가공의 영향을 찾는 것이 다소 어려움이 있는 것으로 보인다.

3.3 오버랩에 따른 Au 밀링

오버랩은 각 위치에 조사되는 빔의 겹침을 빔 직경에 대한 비율로 표현한 것이다. 오버랩 0%는 빔이 전혀 겹치지 않고 인접하게 조사되는 경우이고, 50%는 빔의 절반이 겹치는 경우, 음수의 오버랩인 -100%는 빔직경 만큼 간격을 두고 빔이 조사되는 경우이다.

집속이온빔은 다음 식과 같은 가우시안 분포를 띤다고 알려져 있다.

$$D(r, \sigma) = \frac{D_0}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left(\frac{r}{\sigma \sqrt{2}}\right)^2\right) \quad (2)$$

D_0 는 이온밀도 상수, r 은 반지름 방향의 거리(즉, $r=0$ 인 경우가 빔 중심을 의미함), σ 는 표준 편차로 빔 직경이 2.35 σ 와 같다. D_0 는 단위면적당 조사되는 이온량을 통해 구할 수 있다⁽⁶⁾.

음의 오버랩 가공은 앞서 설명한 바와 같이 빔 직경의 정수 배 만큼 간격을 두고 빔이 조사되는 가공 방식이다. 이때 빔의 오버랩 비율을 조절하면 가우시안 분포의 빔이 중첩되면서 빔의 테일 영향(Beam tail effect)을 줄일 수 있게 되어 정확한 가공을 할 수 있게 된다. 또한 음의 오버랩을 이용하여 가공을 하면 가공 면에 격자패턴이 형성되기도 하는데, 이를 이용하여 나노 크기의 패턴을 제작하기도 한다⁽⁹⁾.

Fig. 6은 AFM을 이용하여 측정된 오버랩에 따른 Au의 3D 가공 형상을 나타낸 그림이다. Au 가공에서도 그림에 보여진 것과 같이 음의 오버랩으로 갈수록 가공바닥면에 규칙적인 격자 패턴이 생기는 현상이 관찰되었다. 가공된 면의 윗면과 아랫면의 면적의 차이는 -500% 오버랩에서 가장 적었으며 가공 영역의 모서리가 가장 뚜렷하게 가공 되었다.

또한 0%로 갈수록 가공된 바닥면의 거칠기는 줄어들어 모서리 가공에서 정확성이 떨어지다가 양의 오버랩으로 갈수록 밀링 프로파일(Milling profile)이 한 방향으로 겹쳐지는 경향을 보였다. 따라서 음의 오버랩이 심할수록 Au의 가공 바닥면에서 격자패턴이 형성되어 가공된 표면이 고르지 못한 특성을 나타내기 때문에 $1 \times 1\mu\text{m}^2$ 의 패턴 가공을 하는데 있어서 적합하지 못하는 것으로 보인다.

Fig. 7은 오버랩에 따른 Au의 가공 깊이를 그래프로 나타낸 것이다. -800%에서 -600% 오버랩은 가공된 깊이도 다른 조건에 비해서 현저히 얇았으며, -600% 오버랩은 가공된 깊이도 다른 조건에 비해서 현저히 얇았으며, -600%에서 0%까지 거의 비슷한 경향을 보이다가 0% 이후의 오버랩에서는 Au의 가공 깊이가 현저하게 깊어지는 경향을 보였다. 이는 오버랩 비율이 증가할수록 빔의 중심 부분이 겹쳐지는 비율이 증가하기 때문에 나타난 것으로 보인다.

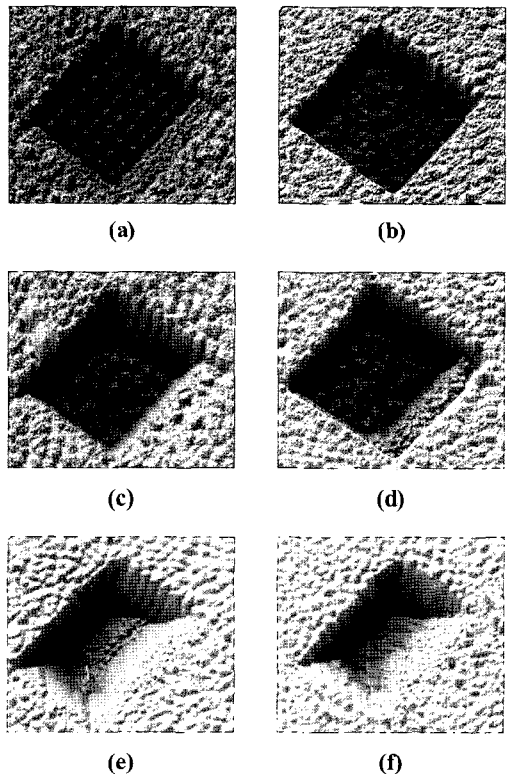


Fig. 6 The dependence of milling profile on the overlap percentages (a) -700% (b) -500% (c) -200% (d) 0% (e) 60% (f) 90%. The images are measured by AFM.

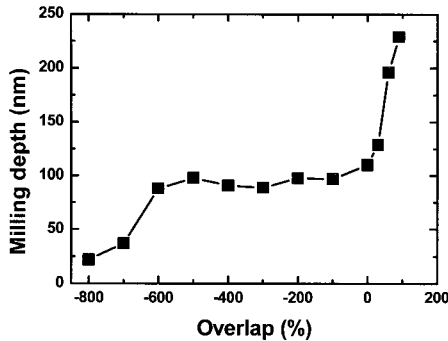


Fig. 7 Effect of the overlap percentages on FIB milling depth of Au

4. 결론

집속 이온빔 장치를 이용하여 Au 밀링 특성을 조사하였다. 집속 이온빔 장치를 이용하여 주입한 이온량에 따라서 가공된 깊이를 AFM으로 측정하여 Au 밀링 일드를 계산하였다. 그 결과를 이용하여 $1 \times 1\mu\text{m}^2$ 정확한 패턴 가공을 위한 변수로 드웰타임과 오버랩을 이용하였다. 드웰타임을 이용한 보정작업은 $1 \times 1\mu\text{m}^2$ 큰 패턴의 가공에서는 빔 테일 영향을 관찰 할 수 없는 것으로 보인다. 오버랩을 이용한 보정작업에서는 가공된 깊이와 가공면의 형상을 AFM으로 측정해본 결과 음의 오버랩 비율이 지나치게 크면 가공면에서 격자패턴이 형성되어 가공면이 고르지 못한 특성을 보이기 때문에 $1 \times 1\mu\text{m}^2$ 패턴을 제작하는데 적절하지 못한 것으로 보인다. 또한 양의 오버랩 비율이 지나치게 크면 가공이 한 쪽 방향으로 치우치는 특성을 보이기 때문에 -500%에서 0%의 오버랩 가공이 적절할 것으로 보인다.

후 기

본 논문은 서울특별시 지원하는 전략산업 혁신클러스터 육성 지원사업(3D Microsystem Packaging을 위한 집합 공정 및 장비개발)으로 지원되어 수행하였습니다.

참고 문헌

- (1) Park, C. W., Lee, J. H., Choi, J. H. and Yu, S. M., 2005, "Design and Manufacturing of Focused Ion Beam Machining System," *Korea Society of Tool Engineers spring meeting*, pp. 30~34.
- (2) Nakayama, M., Yanagisawa, J., Wakaya, F. and Gamo, K., 1999, "Focused Ion Beam Process for Formation of a Metal/Insulator/Metal Double Tunnel Junction," *Jpn. J. Appl. Phys. Part1*, Vol. 38, 7151.
- (3) Chappert, C., Bernas, H., Ferre, J., Kottler, V., Jamet, J. P., Chen, Y., Cambil, E., Devolder, T., Rousseaus, F., Mathet, V. and Launois, H., 1998, "Planar Patterned Magnetic Media Obtained by Ion Irradiation," *Science*, Vol. 280, 1919.
- (4) Kaminsky, W. M., Jones, G. A. C., Patel, N. K., Booij, W. E., Blamire, M. G., Gardiner, S. M., Xu, Y. B. and Bland, J. A. C., 2001, "Patterning ferromagnetism in $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ films via Ga^+ ion irradiation," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 78, 1589.
- (5) Li, J., Malis, T., Donne, S., 2006, "Recent advances in FIB-TEM specimen preparation techniques," *Materials Characterization*, Vol. 57, pp. 64~70.
- (6) Yun, Y. J. and Park, G. S., Ah, C. S., Park, H. J., Yun, W. S. and Ha, D. H., 2005, "Fabrication of Versatile Nanocomponents Using Single-crystalline Au Nanoplates," *Applied Physics Letters*, Vol. 87, 233110.
- (7) Huey, B. D. and Langford, R. M., 2003, "Low-dose Focused Ion Beam Nanofabrication and Characterization by Atomic Force Microscopy," *Nanotechnology*, Vol. 14, pp. 409~412.
- (8) Fu, Y., Bryan, N. K. A., Shing, O. N. and Wyan, H. N. P., 2000, "Influence Analysis of Dwell Time on Focused Ion Beam Micromachining in Silicon," *Sensors and Actuators*, Vol. 79, No. 3, 230~234.
- (9) Han, J., Min, B. K., Lee, S. J., Park, C. W. and Lee, J. H., 2005, "Fabrication of Nano Pattern Using Focused Ion Beam," *International J. of Korea Society of Precision Engineering*, spring meeting.