

집속이온빔을 이용한 나노 패턴 형성

한진*, 민병권, 이상조(연세대학교 기계공학부)
박철우, 이종항(한국산업기술대학교 기계공학과)

Fabrication of a Nano Pattern Using Focused Ion Beam

J. Han*, B.-K. Min, S. J. Lee (School of Mechanical Engineering, Yonsei University)
C. W. Park, J. H. Lee (Department of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic University)

ABSTRACT

Nano pattern is being utilized to produce micro optical components, sensors, and information storage devices. In this study, a study on nano pattern fabrication using raster-scan type Focused Ion Beam (FIB) milling is introduced. Because the intensity of ion beam has Gaussian distribution, the overlapping of the Gaussian beam results in a 3D pattern, and the shape of the pattern can be adjusted by variation of FIB milling parameters, such as overlap, ion dose, and dwell time. The Gaussian shape of single beam intensity has been investigated by experiment, and 3D nano patterns with pitch of 200nm generated by FIB is demonstrated.

Key Words: Focused Ion Beam(집속이온빔), Nano fabrication(나노 성형), Nano pattern(나노 패턴)

1. 서론

나노 패턴은 광학 소자, 기능성 센서, 정보저장기에서의 활용도가 증대되고 있어 다양한 제조방법이 연구되고 있다. 나노 패턴을 가공할 수 있는 기술에는 전자빔, 임프린트 리소그래피 (imprint lithography)¹, 자기조립재료 등 다양한 방법이 시도되고 있으며, 최근에는 집속이온빔 (Focused Ion Beam, FIB) 장치를 이용한 나노 패턴 제조도 연구되어지고 있다^{2,3}.

FIB 가공기술은 비교적 다양한 재료에 적용할 수 있어 실리콘 웨이퍼나 유리 등에 직접 패턴을 가공할 수도 있으며 금속 재료에 나노 임프린트를 위한 금형을 직접 제작하는 데 사용할 수도 있다.

본 연구에서 사용하는 방법은 이온빔 스퍼터링 공정의 하나인 FIB 밀링(milling) 공정을 응용한다. FIB에서 사용하는 이온빔은 빔의 분포가 가우시안 분포를 갖는데, 이때 빔의 조사 위치를 적절하게 조정하면 빔의 크기와 유사한 피치의 연속적인 패턴을 제작할 수 있다. 본 연구에서는 실리콘 재료에 가우시

안 빔의 중첩을 이용하여 패턴을 제작하는 공정의 공정변수를 파악하고, 공정변수 변화에 따른 가공특성의 변화를 파악하고자 한다.

다음 절에서는 이온빔의 강도가 어떠한 형태의 가우시안 분포를 갖는 지를 실험을 통해 확인하고, 이를 이용한 패턴 가공 결과를 논의한다.

2. FIB 를 이용한 패턴 제작

2.1 FIB 밀링

FIB 밀링이란 FIB 를 이용하여 마치 공작 기계에서의 밀링 공정과 유사하게 빔을 일정한 속도로 이동시키면서 이온빔의 스퍼터링(sputtering) 작용을 이용하여 재료를 일정한 두께로 제거하는 방법이다.

FIB 밀링 방법은 이온빔을 이동시키는 방법에 따라 벡터스캔(vector scan)과 래스터스캔(raster scan)이 있다. 벡터스캔은 이동 경로를 시작과 끝점으로 정의해서 아날로그 방법에 따라 연속적으로 빔을 이동시키는 방법이며, 래스터스캔은 Fig. 1 에 보인 바와 같이 일정한 간격으로 한 방향으로 점을 찍듯이 빔

을 이동시키는 방법이다. 본 연구에서는 빔의 조사 간격을 활용하기 위해 래스터스캔 방식을 이용한다.

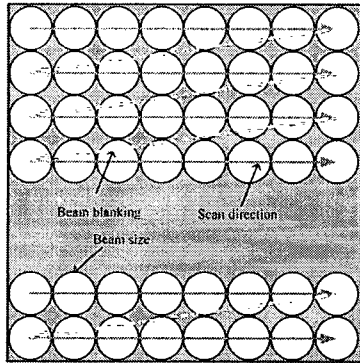


Fig. 1 Raster scan type FIB milling

래스터스캔을 사용하는 FIB 밀링의 중요한 공정 조건은 오버랩과 드웰타임이다. 오버랩은 Fig. 1 에서 각 위치에 조사되는 빔의 겹침을 빔 직경에 대한 비율로 표현한 것이다. Fig. 2 는 3 가지 경우의 오버랩을 그림으로 표현한 것이다.

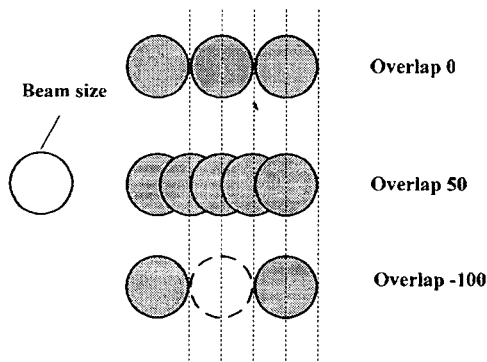


Fig. 2 Definition of overlap factor

오버랩 0 은 빔이 전혀 겹치지 않고 인접하게 조사 되는 경우이고, 50 은 빔의 절반이 겹치는 경우, 음수의 오버랩인 -100 은 빔 직경만큼 간격을 두고 빔이 조사되는 경우이다.

드웰타임은 각 픽셀 당 머물러 있는 조사 시간이 다. 즉 드웰타임이 증가 할수록 한 프레임에서 지점 당 이온빔이 조사되는 시간이 증가하여 한 프레임당 더 많은 가공 깊이가 가공된다. 프레임은 이온빔이 전체 가공영역을 모두 스캔하고 원점으로 돌아오는 것을 말한다. 전체 가공 시간이 같은 경우 드웰타임이 길어지면 프레임 수가 감소하고 반대로 드웰타임이 짧아지면 프레임 수가 증가하여 동일한 양의 이온이 가공 영역에 조사된다.

2.2 패턴의 가공

본 연구에서는 FIB 밀링에서 발생하는 스퍼터링의 기하학적인 특성을 활용하여 패턴을 생성한다. FIB 은 식(1)과 같은 가우시안 분포를 가진다⁴.

$$D(r, \sigma) = \frac{D_0}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{r}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2} \quad (1)$$

식(1)에서, D_0 는 이온밀도상수, r 은 반지름방향의 거리(즉, $r=0$ 인 경우가 빔 중심), σ 는 표준편차로 빔 직경이 2.35σ 와 같다. D_0 는 단위면적당 조사되는 이온량(ion dose)을 통해 구할 수 있다.

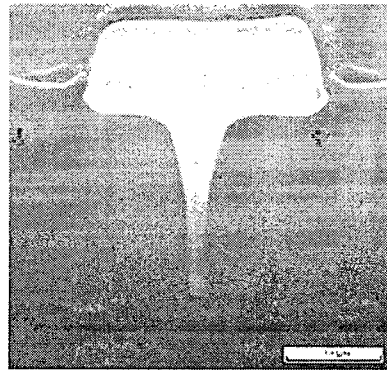


Fig. 3 Cross-section image of spot beam FIB milling (Carbon deposition applied for image analysis)

Fig. 3 는 본 연구에 사용된 FIB 장치(SMI2050, SII Nano Technology)를 이용하여 1318 pA 빔 전류를 2 초간 한 지점에 조사한 후 단면을 관찰한 이미지이다. 조사된 이온량은 1.64×10^{10} 개이다. 그림에서 볼 수 있듯이 스퍼터링이 식(1)의 가우시안 빔 분포를 따름을 알 수 있다.

Fig. 4 는 가우시안 분포를 갖는 빔을 일정한 간격으로 조사하여 패턴을 가공하는 방법에 대한 개념도이다. 앞에서 설명한 래스터스캔을 이용하여 그림과 같이 일정한 간격으로 빔을 조사하면 가공면이 갖는 오목한 형태가 중첩되면서 일정한 간격을 갖는 패턴을 생성하게 된다. 이 방법의 장점중의 하나는 이론적으로는 패턴의 간격이 빔의 직경보다도 작을 수 있다는 점이다.

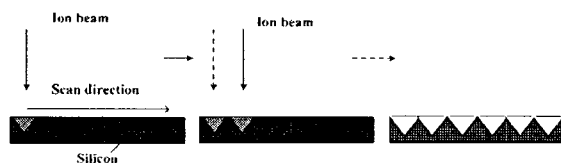


Fig. 4 Patterning procedure

Fig. 5 는 한 지점에 조사한 빔이 만든 형상을 바탕으로 여러 개의 빔이 중첩되는 경우의 기하학적 형상을 예상한 그래프이다. Fig. 5 (a) 한 개의 빔을 이용하여 가공한 경우의 기하학적 형상이며, Fig. 5 (b)는 3 개의 빔이 중첩된 형태의 2 차원상의 그림이다. 실제로는 Fig. 5 (b)에서 아래 부분의 오목한 형태만을 제외하고는 재료가 모두 제거되는 효과를 가져온다. Fig. 5 (c)는 FIB 밀링을 통해서 가공된 3 차원 형상의 최종적인 형태를 보여준다.

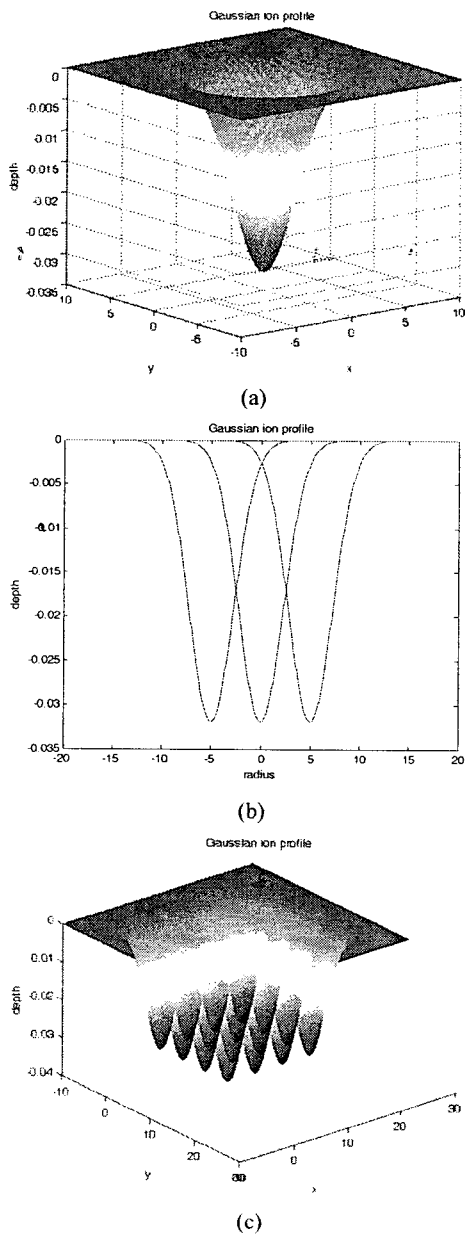


Fig. 5 Simulation of Gaussian beam superposition

3. 결과

2 절에서 설명한 기초 실험과 예측된 결과를 바탕으로 실제 패턴을 제작하였다. 재료는 실리콘 웨이퍼를 사용 하였고 패턴 전체 영역의 크기는 5 탸 x 5 탸 이다.

Fig. 6 은 패턴 가공 결과의 한 예이다. Fig. 6(a)는 가공 면의 확인을 위해 가공물을 30° 기울여서 측정한 FIB 이미지이다. 피치는 200 nm 이며 패턴을 이루는 각각의 콘(cone)형상의 크기는 빗변이 300 nm 밑변이 170 nm 이다. Fig. 6 (b) 에서 볼 수 있듯이 균일한 패턴을 얻을 수 있었다.

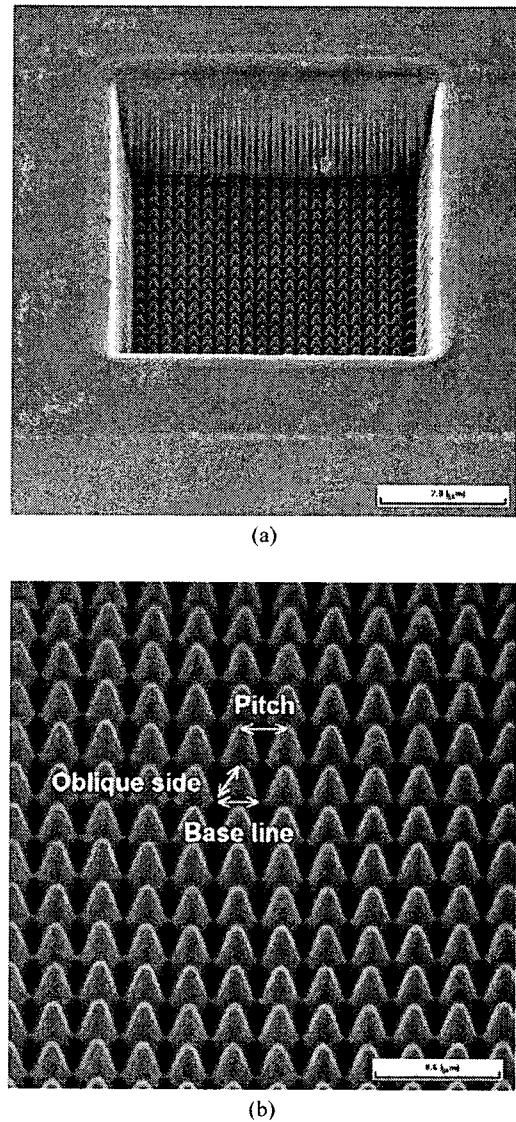
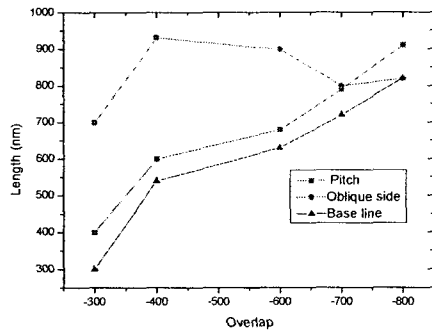
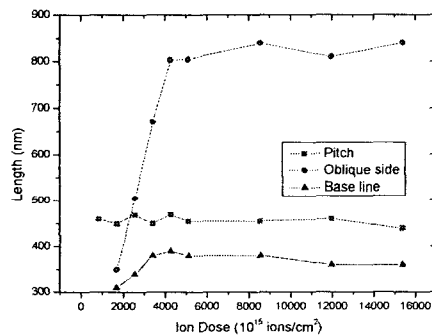


Fig. 6 FIB images of nano pattern

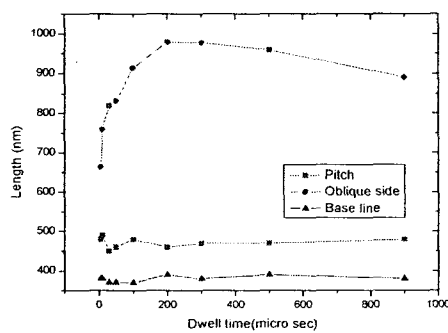
가공 조건에 따라 패턴 특성의 변화를 확인 하기 위해 오버랩, 이온 조사량, 드웰타임을 변화시키면서 가공실험을 수행하였다. 각각의 조건에 대해서 패턴의 치수인 콘 모양의 피치, 빗변, 밑변을 측정된 결과를 Fig. 7에 정리하였다.



(a) Negative overlap



(b) Ion dose



(c) Dwell time

Fig. 7 Pattern geometry w.r.t. process parameters

Fig. 7(a)는 오버랩의 증가에 따라 피치가 증가하고 밑변의 크기도 오버랩에 따라 증가함을 보여준다. Fig. 7 (b), (c)의 결과를 보면 일정 양까지는 이온조사량과 드웰타임에 따라 콘의 빗변이 증가하지만 패턴 형상이 형성된 후에는 정상상태에 이르러 일정 모양을 유지하고 패턴의 전체 깊이만 깊어졌다. 이는 드웰타임에 따라 스캔프레임의 수가 결정 될 뿐 총 이온 조사량은 동일 하기 때문에 Fig. 6 (b)처럼 완전한 패턴 모양 형성 후에는 동일한 거동을 함을 알 수 있다. 즉 패턴 특성은 빔의 조사 간격을 통해 피치와 밑변의 크기가 결정이 되고 이온 조사량으로 패턴을 이루는 빗변의 크기를 조정할 수 있다.

4. 결론

FIB 밀링으로 실리콘 웨이퍼에 최소 피치 200 nm 패턴을 이루는 콘 형태의 나노 패턴을 제작하였다. FIB의 가우시안 분포 특성을 응용하여 빔 직경 크기 수준의 나노 패턴을 제작할 수 있었으며, 빔의 드웰타임, 이온 조사량, 오버랩 등의 파라미터의 변화에 따른 패턴 형성 특성을 비교하였고 공정 변수의 조정으로써 패턴의 형태를 변화 시킬 수 있다.

후기

본 연구는 산업자원부의 산업 기술 기반 조성 사업인 마이크로 나노 점선 가공기반 구축 사업의 결과물입니다.

참고문헌

1. Sheehan, P. and William, P., "Nanoscale deposition of solid inks via thermal dip pen nanolithography," Applied Physics Letters, Vol. 85, pp. 1589-1591, 2004.
2. Lugstein, A. et al., "Size and site controlled Ga nanodots on GaAs seeded by focused ion beams," J. Vac. Sci. Technol. B 22(3), pp 888-892, 2004.
3. Ueda, M. et al., "Focused ion beam patterning for fabrication of periodical two-dimensional zinc oxide nanodot arrays," Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 43, No. 5B, pp. L652-L654, 2004.
4. James, W., "Ion Solid Interaction," Cambridge University Press, p. 118, 1996.