

집속이온빔을 이용한 마이크로/나노스케일에서의 실리콘 금형 가공 특성

The Characteristics of Focused Ion Beam Utilized Silicon Mold Fabrication on the Micro/Nano Scale

김홍배^{1,✉}, 노상래²
Heung-Bae Kim^{1,✉} and Sang-lai Noh²

¹ 한국생산기술연구원 (Korea Institute of Industrial Technology, KITECH)

² 동서울대학 항공자동차기계공학부 (Division of Aerospace, Automobile and mechanical engineering, Dong Seoul University)

✉ Corresponding author: heungbaekim@gmail.com, Tel: 031-8006-8787

Manuscript received: 2011.2.10 / Accepted: 2011.6.7

The use of ion beams in the micro/nano scale is greatly increased by technology development. Especially, focused ion beams (FIBs) have a great potential to fabricate the device in sub micro scale. Nevertheless, FIB has several limitations, surface swelling in low ion dose regime, precipitation of incident ions, and the redeposition effect due to the sputtered atoms. In this research, we demonstrate a way which can be used to fabricate mold structures on a silicon substrate using FIBs. For the purpose of the demonstration, two essential subjects are necessary. One is that focused ion beam diameter as well as shape has to be measured and verified. The other one is that the accurate rotational symmetric model of ion-solid interaction has to be mathematically developed. We apply those two, measured beam diameter and mathematical model, to fabricate optical lenses mold on silicon. The characteristics of silicon mold fabrication will be discussed as well as simulation results.

Key Words: Focused Ion Beam (집속 이온빔), Micro/Nano Fabrication (마이크로/나노 가공), Micro Mold (초소형 금형), Computer Simulation (전산 모사)

기호설명

F_{tot} = total flux at the calculation point

F_{direct} = flux of incident ions

$F_{indirect}$ = flux of sputtered atoms

θ = angle of ion beam incidence

α = emission angle of sputtered particles

β = angle of ion beam incidence

S_c = sticking coefficient

$Y(\theta)$ = sputter yield(=sputtered atoms/ion)

$F_{2d}(\alpha)$ and $F_{3d}(\alpha)$ = distribution of sputtered particles in

2D and 3D calculation domain, respectively.

d = distance between two calculation points

φ = rotation angle in the rotational symmetric model

ϕ = rotation angle along the surface normal at the calculation point

1. 서론

20 세기 후반에 계속된 전자공학의 눈부신 발전으로 반도체공학 및 관련 장비기술이 비약적으로 발전하여 왔다. 특히 반도체 기술의 핵심인 전

자(Electron), 이온(Ion) 및 광자빔(Photon beam)의 사용은 반도체, 디스플레이, 태양전지 및 마이크로나노 스케일에서의 가공 등에 있어서 핵심 기술로 많은 연구자들에 의해 연구가 되어 왔다. 이에 관련 기술 및 장비산업은 은 활용 범위를 확대 하고 있으며 눈부시게 발달하고 있다.¹

이온빔은 전자 및 광자 빔과는 다른 물리적 특성으로 인하여 차별화 된 사용 범위를 확대하고 있다. 특히 이온빔은 이온원(Ion source)에서 축출한 이온들을 가속하고 원하는 모재(Substrate) 위에 집속하여 충돌(Collision)시키는 운동량 전달을 통한 스퍼터링(Sputtering)이 가공 원리이므로 모재 위에 감광 레지스트(Photoresist) 없이 직접 가공이 가능하다.^{2,3} 현재 집속 이온빔의 사용은 주로 반도체 공정에 사용되는 마스크(Mask)의 수선(Repair), 증착(Deposition) 및 가공을 통한 반도체 단면 검사, MEMS(Micro-electro-mechanical system)와 같은 초소형 구조물의 가공에 사용되고 있다.⁴

현재 정밀한 3 차원 구조물을 가공하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며 이에 병행하여 이온과 모재의 상호작용에 대한 연구와 추가적으로 공급되는 가스 분위기에서의 가공에 관한 연구가 진행되고 있다. 이러한 이온빔 응용 가공기술은 NEMS/MEMS 가공 기술과 초소형 금형 가공기술에 많이 활용되고 있으며 마이크로/나노 영역에서 다양한 응용 사례가 보고되고 있다.⁵

집속 이온빔을 이용한 정밀한 3 차원 구조물을 가공하기 위해서는 이온과 모재의 상호작용에 대한 이해를 바탕으로 하는 가공 모델의 확립이 필수적이다. 또한 가속 및 집속 된 이온빔은 전자 및 광자빔과 비교할 때 그 질량 차이가 크므로 공간전하(Space charge)와 Columbic 상호 작용이 전자빔에 비해 크게 발생한다는 특징이 있으며, 이온빔에 의한 빔 조리개(Aperture)의 마모 및 집속 조건에 따라 빔 직경이 변한다는 단점이 있다. 그러나 대부분의 상업용으로 시판되고 있는 집속 이온빔 칼럼들은 공간전하 및 Columbic 상호작용을 정확히 고려한 설계가 되고 있지 못한 실정이며, 정확히 고려하여 제작되어있다 하더라도 조리개(Aperture)의 마모 및 집속 조건에 따라 변화된다. 또한 상업용 전자 및 이온빔 칼럼들은 제작사들에 의해 빔 직경 및 그에 관련 된 변수 값들이 제공되는데, 이러한 값들은 사용자들에게 참고하라고 제공하는 설계 값이며 실제 빔 변수와는 커다란 차이가 있다.⁶

이러한 직경 변화의 문제는 가공 형상의 왜곡으로 이어지며 나아가 정확한 빔 직경과 그 형상을 모르는 상태에서 사용자들에 의해 사용되고 있어 많은 문제를 야기하고 있다. 빔 직경과 형상을 모르는 상태에서는 정밀한 가공을 수행할 수 없으므로 다수의 연구자에 의해 빔 직경 측정을 위한 다양한 시도가 보고되었다.⁶

이 연구의 목표는 집속 이온빔을 이용하여 원하는 초소형 형상을 실리콘 모재 위에 가공하고 그 가공 특성을 연구하는 것이다. 이 목표를 달성하기 위해서는 위해 아래의 3 가지 사항을 달성하여야 한다.

- 1) 이온빔의 직경과 그 형상의 측정방법 확립
- 2) 가공 형상에 부합되는 수치모델 확립
- 3) 빔 직경과 모델을 근거로 한 가공방법 연구

정밀한 가공을 위해서는 가공에 사용되는 빔의 형상, 전류밀도, 주어진 픽셀 간격(Pixel spacing), 드웰 타임(Dwell time) 및 이들에 의해 정의되는 가공 영역에서의 이온 플루언스(Fluence)를 알아야 하므로 빔의 직경 및 그 형상의 측정에 관한 연구가 선행 되어야 한다. 이를 바탕으로 미리 디자인 된 렌즈형상을 가공하기 위해 각각의 픽셀에 필요한 이온의 양을 조절하여 그 가공 깊이를 조절한다. 가공형상으로는 회전대칭 특성을 가지는 3 차원 형상의 초소형 원형 렌즈를 선택하였다.

이 논문에서는 기존에 발표된 2 및 3 차원 가공 모델을 확장하여 집속 이온빔을 이용한 회전대칭 형상 가공을 위한 회전대칭 모델을 제안한다. 이 모델에서는 집속 이온빔의 이용한 가공에서 많은 제약으로 작용하는 스퍼터 된 원자들에 의한 재증착 플럭스(Redeposition flux)를 고려하였다. 제안된 모델을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하고 실험을 통하여 가공된 결과와 비교하여 제안된 회전대칭 모델을 검증한다. 이를 위해서 빔 직경 및 그 형상 측정에 관한 방법에 대해 논의하고 검증 절차에 대해서도 논의한다.

마지막으로 제안된 회전대칭 모델 및 측정 된 빔 직경과 그 형상을 이용하여 원하는 형상의 실리콘 금형을 제작하는 방법을 고찰하고 그 가공 특성에 관해 논의한다.

2. 기존 모델

2.1 삼차원 모델

3 차원 모델을 설명하기 위한 모형이 Fig. 1 에 보여지고 있으며, Kim^{7,8} 등이 발표한 3 차원 모델 이 수식 (1)-(3)에 나타나 있다. 이 수식은 3 차원 형상의 모든 표면을 미소 길이를 가지는 사각형 패치로 표현하고, 각 패치의 이온빔에 의해 가공 되는 표면의 변화와 이때 탈락되는 원자들의 분포 를 고려하여 계산한다. 탈락된 재증착 원자들은 탈락지점에서 표면의 법선 방향을 중심으로 코사 인분포를 가지고 모든 방향으로 날아가 다른 표면 에 증착 되므로 이온빔에 의한 가공과는 다른 방 향의 표면 변화를 유도한다.

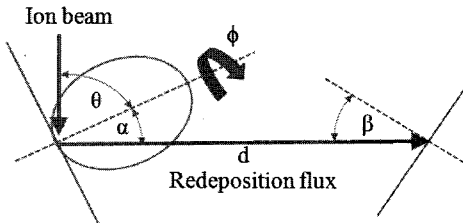


Fig. 1 Schematic illustration of ion beam process.

$$F_{tot} = F_{direct} + F_{indirect} \quad (1)$$

$$F_{direct} = F_{incident} Y(\theta) \cos(\theta) \quad (2)$$

$$F_{indirect} = -S_c \int \frac{F_{direct} f_{3D}(\alpha) \cos(\beta)}{d^2} dA \quad (3)$$

여기서 표면의 변화는 원자의 탈락을 유도하는입 사이온빔 플럭스(F_{direct})에 의한 가공과 이로 인해 발생하는 탈락 원자들의 재증착 플럭스($F_{indirect}$)에 의해 변화되므로 전체 플럭스(F_{total})는 두 플럭스의 합으로 표현된다.

또한 $Y(\theta)$ 는 입사각도에 따른 스퍼터 율로 실리콘의 경우 수직입사에서 스퍼터 율은 2 에서 각도가 증가함에 따라 점차 증가하다가 75-80 도 부근에서 최대값을 가지며 80-90 도의 부근에서 입사 이온의 반사에 의해 급격하게 감소하게 된다. S_c 는 재증착 플럭스의 표면과의 접촉계수(Sticking coefficient)로서 실리콘의 경우 1 을 사용해도 그 결과가 신뢰할만하다는 결과가 있으며,^{7,8} d 는 재증

착 플럭스의 발생지점과 재증착이 이루어지는 표 면과의 거리, f_{3D} 는 재증착 플럭스의 3 차원 방출특 성 함수, α 는 재증착 플럭스의 방출각, β 는 재증착 플럭스의 입사각, 그리고 dA 는 재증착 플럭스가 발생하는 전체 면적을 적분하기 위한 미소면적을 의미한다.

2.2 이차원 병진대칭 모델

3 차원 표면 전체를 작은 미소면적으로 나누어 계산하므로 많은 계산 시간이 소요되므로, 2 차원 단면상에 계산하는 것이 필요하다. 만일 가공 영역이 정사각형이 아닌 Fig. 2(b)와 같이 한 변의 길 이가 다른 한 변의 길이에 비해 작은 직사각형이 거나 Fig. 2(c)와 같이 한 변이 오픈 되어 있다면 3 차원의 재증착 플럭스를 2 차원으로 투영하여 아 래와 같은 식 (4)로 계산할 수 있음이 Kim⁸ 에 의 해 보고 되었다.

$$F_{indirect} = -S_c \int \frac{F_{direct} f_{2D}(\alpha) \cos(\beta)}{d} dl \quad (4)$$

여기서 $f_{2D}(\alpha)$ 는 식(3)의 재증착 플럭스의 3 차원 분포 $f_{3D}(\alpha)$ 를 2 차원적으로 투영한 것으로 3.2 절에 서 자세히 논의하며, dl 은 2 차원에서의 단위의 미 소길이를 의미한다.

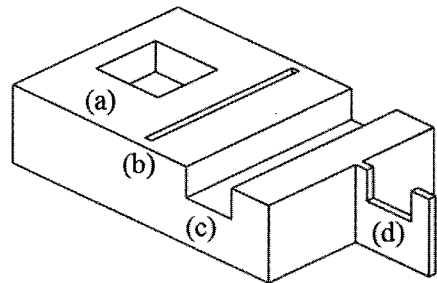


Fig. 2 Schematic illustration of various simulation structures

Orloff⁹ 등은 이러한 2 차원 및 3 차원에서의 재 증착 플럭스 분포를 무시하고, 2 차원 계산을 더욱 단순화하기 위해 실제 사각형 영역을 Fig. 2(d)와 같이 직사각형이 아닌 미소 두께를 가진 박형 가 공물로 단순화하여 근사식 식(5)를 보고하였다. 이 식(5)에서는 식(4)에 있는 3 차원 분포를 가지

는 재증착 플럭스의 2 차원 투영식 항 $f_{2d}(\alpha)$ 가 없으므로 재증착 플럭스가 없는 박형 가공물에서는 (Fig. 2(d)) 사용할 수 있으나 재증착 플럭스를 고려해야 하는 가공형상에서는(Fig. 2(a)-(c)) 사용할 수 없다.

$$F_{indirect} = -S_c \int \frac{F_{direct} \cos(\alpha) \cos(\beta)}{d} dl \quad (5)$$

따라서 식(4)의 2 차원 모델은 직사각형의 한 변이 오픈되어 있거나 또는 한 변의 길이가 다른 한 변에 비해 매우 작은 Fig. 2(b)-(c))의 경우에만 타당하고, 식(5)는 미소 두께를 가지는 박형 형상에 대해서만 타당하므로 집속 이온빔을 이용한 단일 픽셀 가공 및 회전대칭을 가지는 렌즈와 같은 3 차원 회전대칭 형상의 경우에는 사용할 수 없다. 집속 이온빔을 이용한 단일 픽셀 가공은 서브 마이크로 영역에서의 Pillar 등을 가공하는데 사용되며, 나아가 나노-도트(nano-dot)를 가공하는데 사용된다.

단일 픽셀 가공 및 회전대칭 형상을 가공하기 위해서는 식(1)의 3 차원 모델을 직접 사용하면 되지만 계산시간이 많이 소요되므로 회전대칭 모델의 개발이 필요하다.

3. 회전대칭 모델과 스퍼터 된 원자들의 분포

3.1 회전대칭 모델

회전대칭 모델을 위한 도식이 Fig. 3 에 그리고 모델은 식(6)에 나타나 있다. 회전대칭이므로 미소 높이 dl 과 미소각도 $d\phi$ 를 가지는 사각형의 미소 패치를 π 까지 적분하고 2 배를 하여 재증착 플럭스를 계산하므로 3 차원의 계산보다 계산시간이 줄어들게 된다. 이때 재증착 플럭스는 2 차원 투영식이 아닌 3 차원 항 $f_{3d}(\alpha)$ 를 사용한다.

$$F_{indirect} = -2rS_c \int dl \int_0^\pi \frac{F_{direct} f_{3D}(\alpha) \cos(\beta)}{d^2} d\phi \quad (6)$$

여기서 α, β 그리고 d 는 ϕ 의 함수이다. 실리콘의 경우 식(3)(4) 그리고 (6)에 있는 접착계수 S_c 는 이미 언급한 것과 같이 1 을 사용해도 그 결과가 신뢰할 수준이라는 것을 Kim^{7,8} 의 연구에서 알았다.

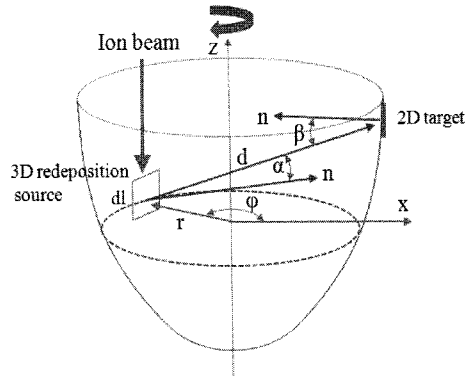


Fig. 3 Illustration of rotational symmetric sputtering and redeposition model

3.2 스퍼터 된 원자들의 분포

식(3) 및 식(6)에 사용된 $f_{3D}(\alpha)$ 는 스퍼터 된 원자들의 3 차원 분포를 의미하며, 아래의 식 (7)의 정규화(normalization) 함수를 만족하는 상수를 구하여야 한다.

$$1 = \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} d\alpha \sin(\alpha) f(\alpha, \phi) \quad (7)$$

또한 식(2)의 2 차원 투영식인 $f_{2D}(\alpha)$ 는 수학적으로는 구형 좌표계(Spherical coordinate)에서 베타 함수(Beta function)를 이용하여 구할 수 있다. 따라서 단일 계산 영역이 박형 직사각형이라면, 내부에서의 투영되는 재증착 플럭스가 없으므로 Orloff 등이 제안한 식(5)를 사용해도 무방하다. 그러나 단일픽셀 및 회전대칭 형상의 경우, 회전축을 중심으로 모든 면에서 재증착 플럭스가 발생되고, 이 재증착 플럭스가 모든 가공 영역에 재증착 되므로 3 차원 식(1)를 사용하거나 계산시간의 단축을 위해 회전대칭 모델인 식(6)을 사용하여야 한다.

4. 집속 이온빔 직경 측정

이온빔의 직경 및 빔의 형상의 측정에 관한 다양한 시도와 연구가 이루어져왔다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 빔 직경 및 형상 측정에 관한 연구가 Ward¹⁰ 등에 의해 수행되었으며, Harriott¹¹ 등은 단일 빔(single pixel) 가공에서 이온의 종류를 변경하면서 가공된 폭과 전류의 변화를 이용하여 빔의

직경을 계산하였다. 또한 Ben Assayag¹² 등은 집속된 Ga⁺ 빔을 사용한 이온 주입에서 이온의 입사에 의해 발생한 변질층(Damage layer)의 분포를 이용하여 직경 및 형상을 측정하였다. 최근에 Lugstein¹³ 등은 가공 깊이가 작다면 단일픽셀 가공 형상이 빔의 형상과 비례한다는 조건으로 AFM 을 이용하여 단일픽셀 가공의 형상을 측정하고 빔 직경과 형상을 계산하였으며, Patterson¹⁴ 등이 이온빔을 이용하여 박막에 관통 홀을 가공하며 실시간으로 측정된 투과 이온전류를 이용하여 빔의 직경을 구하였다.

이번 연구에서는 위에 언급된 방법들을 개선하여 AFM 이나 기타의 장비없이 직접 빔 형상과 직경을 계산하는 방법을 제안한다. 빔의 형상을 측정하기 위해 이온빔을 이용하여 라인 밀링(Single line milling)을 수행하고 전자현미경을 이용하여 그 단면의 형상을 측출한 한다. 이때 가공 중에 발생하는 재증착의 영향을 최소화하기 위해 가공 깊이는 전자현미경을 이용하여 측출 가능한 범위 내에서 최소화해야 한다. 측출한 단면이 회전 축을 기준으로 회전대칭이라고 가정하면 빔의 형상과 일치하며, 전류 밀도 J(r)은 아래의 식 (8)과 빔의 전류 I_{tot}를 이용하여 계산이 가능하다.

식(8)을 만족하는 계수(Coefficient) k 를 구하여 빔의 중심에서의 최대 전류 밀도 값(Maximum current density)을 구할 수 있다. 이러한 방법은 가공 깊이가 깊지 않을 경우 빔의 형상은 가공형상과 비례한다는 전제가 있으므로 가공 깊이를 최소화하여야 하지만 가공 중에 발생하는 빔 유동(Drift)등의 제한이 있으므로 가공 깊이를 가공 폭의 50% 이내 정도로 유지하는 것이 유리하다.

$$I_{tot} = 2\pi k \int_0^{\infty} J(r)rdr \quad (8)$$

5. 회전대칭 형상의 가공

이온빔을 이용한 회전대칭을 가지는 마이크로 렌즈가공 관련 연구는 렌즈의 원하는 굴절율(refractive index) 및 렌즈의 성능을 구현할 수 있는 재료에 직접 가공하여 렌즈를 완성하는 방법과 원하는 형상의 렌즈를 금형 재료에 직접 제작하고 이를 이용하여 폴리머(Polymer) 재료 위에 가열하고 가압 성형하여 대량으로 생산하는 방법으로 크

게 나뉘어 진다. 실리콘 모재 위에 제작된 렌즈 형상은 직접 렌즈 등으로 사용할 수 있다. 또한 실리콘의 우수한 기계적 성질을 이용하여 PMMA 와 같은 재료를 가압 성형하는 방법으로도 사용할 수 있다.

이번 연구에서는 원하는 회전대칭 형상의 렌즈를 실리콘 모재 위에 가공하는 방법을 연구하고자 한다. 렌즈의 가공을 위해 가공 영역, 즉 시야각(Field of View, FOV)을 일정한 간격을 가지는 cell 로 나누고 이 최소 셀 안에 원하는 픽셀 간격을 가지는 픽셀들을 위치하여 가공을 수행한다. 이때 각각의 픽셀들의 드웰 타임(Dwell time)을 마이크로 초(Micro second) 단위로 설정하여 가공 깊이를 조절하는 방법을 택하였다.

6. 실험결과

6.1 이온빔 직경 측정 실험

실험에 사용된 장비는 FEI 사의 NOVA 200 장비로 수직으로 장착된 전자빔 칼럼과 수직 축과 52° 각도로 설치된 이온빔 칼럼을 가진 듀얼빔 장비이다. 실험에서는 30keV 로 가속된 48pA 의 Ga⁺ 빔을 사용하였으며, 실험 후 전자빔을 이용하여 이미지화 하였다

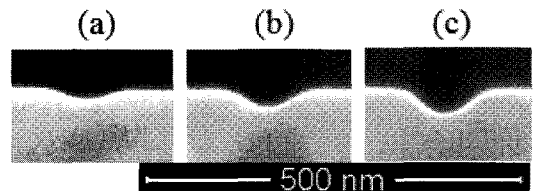


Fig. 4 SEM images of cross-sectional profiles fabricated using focused ion beam single line milling. (a) 200, (b) 400 and (c) 600 passes were applied with specimen beam current of 48pA

이온빔의 최대 집속 조건을 이온빔 이미지를 이용하여 확인한 후, 라인가공을 수행하였으며 그 단면이 Fig. 4 에 나타나 있다. 픽셀 간격은 1nm, 드웰타임은 100ns 를 이용하여 가공하였다. 이온도즈(Dose)가 작고 그 가공 깊이가 작다면 이온빔의 형상은 그 단면 형상과 비례한다는 Lugstein¹³ 과 같은 가정 하에 그 단면의 형상을 SEM 이미지에서 디지털화(Digitizing)하여 구하였다. 이때 중심에서의 최대 전류밀도를 계산하기 위해 식(8)에

전체 전류 48pA 를 이용하여 구하였다.

이러한 방법으로 계산한 빔의 전류밀도 형상이 Fig. 5 에 보이고 있으며, 최대전류밀도는 12300 A/m², 빔의 직경은 FWHM 50nm 으로 이 값은 Patterson¹⁴ 이 30pA 의 빔을 44mm 의 working distance 에서 박막을 관통 가공하면서 측정한 46nm 와 비교할 수 있다. 또한 제작사에서 사용자들의 편의를 위해 매뉴얼에 표시한 48pA 빔의 최대 집속조건에서의 직경이 18nm 라는 최적설계 값과도 비교해 볼 수 있다. 실제 많은 연구자들이 18nm 라는 최적설계 값을 연구에 이용하고 있어 연구결과에 많은 오류를 포함하고 있으며, 정밀하고 정확한 연구를 위해서는 실험 전에 정밀한 빔 직경의 측정이 필요하다.

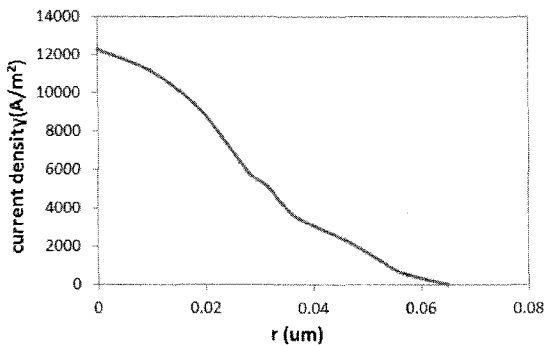


Fig. 5 calculated current density profile. The maximum current density is 12300 A/m²

FWHM(Full width at half maximum)으로 정의되는 빔 직경 d_f 를 x 그리고 y 방향의 픽셀간격 p_{sx} 와 p_{sy} 를 이용하여 raster scan 을 수행할 경우, FWHM 으로 정의되는 Gaussian 빔의 합은 Error 함수이므로 박스 밀링에 의해 형성된 바닥은 평평한 면이 된다. 가공에 사용된 픽셀 간격(1nm)과 드웰 타임(100ns) 및 패스(pass) 값을 이용하여 박스 밀링에 사용된 이온 도즈를 계산하고 실제 가공 깊이를 측정하여 비교한다. 따라서 빔 전류밀도 값을 구한 후, 검증하기 위해서는 박스 밀링을 수행하고 최대 깊이를 측정하여 계산한다. 이때 모재인 실리콘의 같음 이온에 대한 수직입사에서의 스퍼터율(sputter yield)은 2.0 을 사용하였다.^{7,8}

가공된 박스 밀링 형상이 Fig. 6 에 보이고 있으며 가공 깊이가 가공영역 보다 작으므로 대부분의 재증착 플럭스는 벽면에 재증착되지 않고 외부

로 탈출하기 때문에 가공 깊이는 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 6(a)를 가공하기 위해 사용된 이온 도즈는 4.65×10^{16} ions/cm² 으로 사용된 스퍼터율 2.0 을 이용하여 가공 깊이를 계산하면 20.3nm 이다.

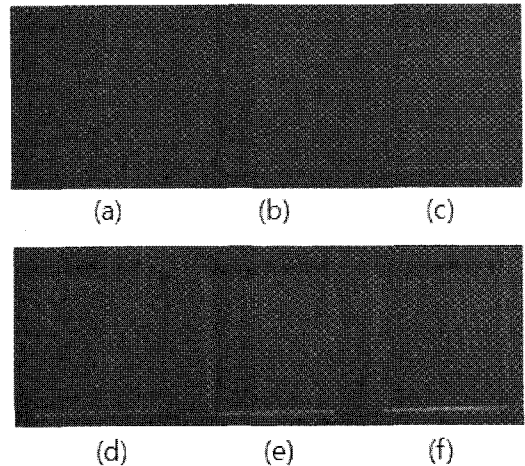


Fig. 6 SEM images of box milled rectangular features(2um×1um). The value of depth: (a)19nm, (b)40 nm (c)60nm, (d)80nm, (e)100nm and (f)120nm. The images are not in scale because they are tilted to 5°

6.2 회전대칭 모델 검증 및 가공

회전대칭 형상의 가공 모델 식(8)을 검증하기 위해 앞 절에서 구한 48pA(전류밀도 1.23A/cm²)의 빔 직경을 이용하여 렌즈를 가공하였다. 렌즈의 입구 직경은 5 μm 이고 깊이는 500 nm 인 원형 렌즈로서 빔 전류밀도(current density)의 전체적인 프로파일(Profile)을 구성하기 위해 Vasile⁴ 의 드웰타임 가변 방법을 사용하였다. 이때 각 지점에서의 드웰 타임은 가공 깊이가 작고 종횡비가 작으므로 가공 렌즈의 형상과 일치하여 변화시켜 가공을 하였다. 이때 최소 드웰 타임은 100ns 이다. 따라서 각각의 렌즈가공에 필요한 이온 도즈는 동일하므로 가공시간 또한 8 분으로 동일하다. 가공 패스를 증가시켜 가공한 렌즈형상이 Fig. 7 에 가공 패스와 함께 보이고 있다. 가공 전의 전류밀도 형상이 가공하고자 하는 렌즈와 같은 형상이었으므로 Fig 7(a)의 초기 가공 형상은 렌즈 형상과 일치하고 있다.

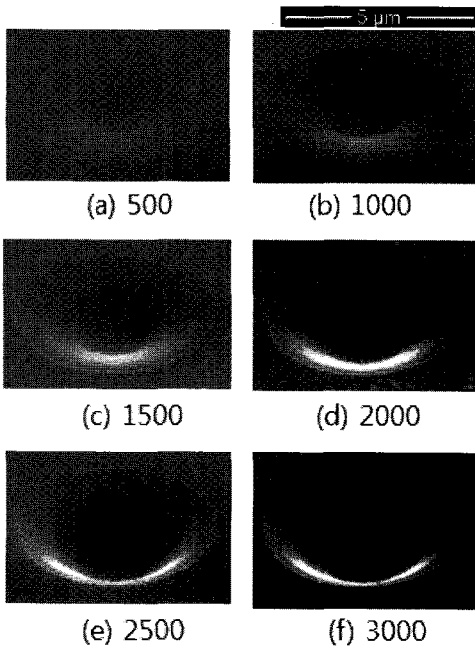


Fig. 7 SEM images of fabricated features that are similar to rotational symmetric. The number of pass is noted at each image. The pixel spacing is fixed to 10nm.

그러나 가공 패스의 수가 증가할수록 렌즈의 중심은 더 많이 가공되고 측면은 상대적으로 가공이 작게 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 두 가지 이유로 설명할 수 있다. 주된 이유는 가공 중에 발생하는 원자들의 재증착 플럭스가 외부로 탈출하지 못하고 측면에 재증착을 하여 상대적으로 측면은 가공이 느리게 이루어지기 때문이다. 이에 더해 빔의 전류밀도 프로파일이 렌즈의 형상과 일치하여 중심부근에서 최대값을 가지므로 가공이 많이 이루어지기 때문이다.

중심과 측면에서의 가공 깊이의 차이는 가공 모델 식(6)을 컴퓨터 프로그램을 이용하여 시뮬레이션(Simulation)하여 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과가 Fig. 8에 보여 지고 있는데, Fig. 8(a)는 재증착 플럭스를 고려하지 않았을 경우의 가공형상을 보여주고 있으며, Fig. 8(b)는 재증착 플럭스를 고려하여 시뮬레이션 한 결과이다.

재증착 플럭스를 고려하지 않았을 경우, 측면은 경사가 큰 부드러운 면이 만들어지는 반면, 재증착 플럭스를 고려한 시뮬레이션에서는 가공 중 발생한 원자들의 재증착으로 인하여 가공 량이 작

아지고 측면의 경사가 상대적으로 완만하다는 것을 알 수 있다.

또한 재증착 플럭스를 고려한 시뮬레이션에서는 실제 가공한 Fig. 7의 결과들과 같이 렌즈의 중심 바닥이 더 볼록하게 가공된 것을 알 수 있다. 가공 바닥의 중심에서 재증착을 고려한 결과는 가공 깊이가 재증착을 고려하지 않았을 경우와 비교하여 작다는 것을 알 수 있다.

이러한 결과로 회전대칭을 가지는 형상에 대해 재증착 플럭스를 고려한 가공 모델 식(6)은 정성적으로 타당하다는 것을 알 수 있다. 또한 식(6)은 기존에 발표하여 정량적으로 타당성을 가진 3차원 모델 식(1-3)을 단순화 및 계산시간의 단축을 위하여 변형한 것이므로, 식(6)의 정량적인 타당성은 참고문헌을 참고하는 방법으로 이번 연구를 제한한다.

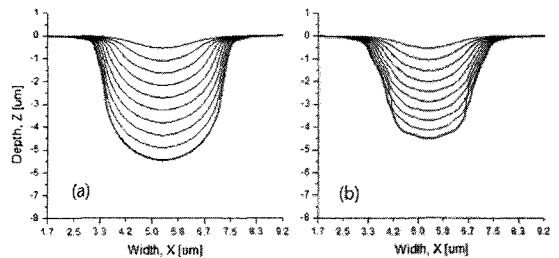


Fig. 8 Simulation results of rotationally symmetric lens structures calculated without (a) and with (b) redeposition flux

6.3 회전 대칭을 갖는 금형 가공 및 특성

이온빔 가공 형상은 x, y 각각에 설정된 픽셀 간격에 의해 많은 영향을 받는데, Fig. 9에는 다양한 픽셀 간격에 의해 가공된 형상을 보여주고 있다. 가공 패스는 Fig. 7(f)와 같은 3000 이며 픽셀간격은 Fig. 9(a)가 가장 크므로 가공 형상의 거칠기가 가장 크며, 픽셀 간격이 가장 작은 Fig. 9(f)의 표면 거칠기(surface roughness)가 작다는 것을 알 수 있다. 이 결과는 Fu^{15} 의 연구결과와 일치한다.

7. 결론

이온빔을 이용한 회전대칭 형상을 가지는 초소형 렌즈를 가공하였다. 이를 위하여 회전대칭을 가지는 이온빔 가공에 대한 수학적 모델을 탈락 원자에 의한 재증착 플럭스를 고려하여 정립하였다. 원하는 형상을 가공하기 위해 시편 위에서 이

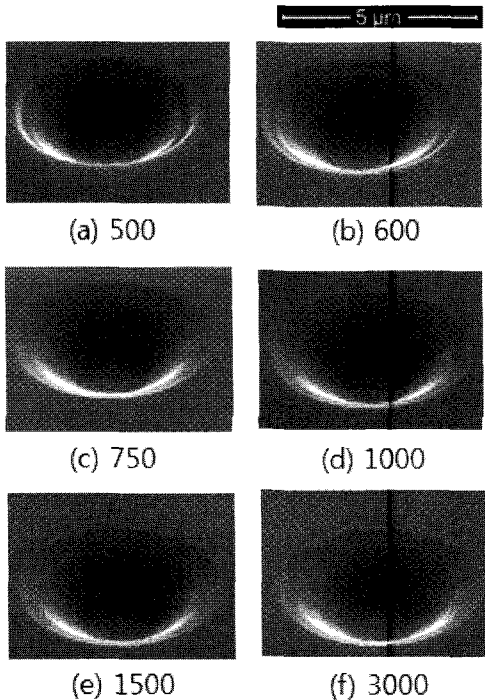


Fig. 9 SEM images of fabricated rotationally symmetric structures: pixel spaces are (a)60nm, (b)50nm, (c)40nm, (d)30nm, (e)20nm and (f)10nm. The number of pass is noted at each image

온빔의 직경과 그 형상을 실험을 통하여 구하였다. 이온빔의 직경은 이온빔을 이용한 라인가공의 단면 형상을 2 차원 모델을 이용하여 역으로 계산하였으며, 계산된 직경과 형상의 검증을 위하여 박스 밀링을 수행하여 가공에 사용된 이온전류밀도와 가공 깊이를 비교하여 계산된 빔의 형상과 최대 전류밀도가 신뢰성이 있음을 알 수 있었다.

계산된 빔 직경과 형상을 이용하여 입구 직경이 5 μm 이고 깊이가 500 nm 인 렌즈를 가공하였고, 정립한 모델을 이용한 시뮬레이션 결과와 비교하여 신뢰성이 있음을 확인하였다. 가공 깊이가 깊어짐에 따라, 즉 이온 플루언스(Fluence)가 증가함에 따라 가공의 중심부는 측면보다 가공이 더 많이 이루어짐을 알 수 있었다. 이는 가공 중 발생한 원자들의 재증착에 의해 측면의 가공량이 작아지는 것과 가공을 위해 사용한 전류밀도 값이 프로파일의 중앙부가 측면보다 크기 때문이다. 또한 가공에 사용한 픽셀 간격에 따라 가공 거칠기가 달라지는 특성을 보였으며, 이때 픽셀 간격이 클수록 가공 거칠기가 큰 특성을 보였다.

집속이온빔을 이용한 정밀가공을 위해 2 및 3 차원 모델을 확장하여 단일픽셀 가공을 위한 회전대칭 모델을 수식화하고 이를 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과는 실험결과와 비교하였으며, 제안된 회전대칭 모델이 실험결과 및 시뮬레이션 결과를 반영하고 있음을 확인하였다. 제안된 모델을 바탕으로 이온빔을 이용한 직접가공 및 증착을 이용하여 pillar array 를 정밀하게 가공하는 연구를 추후에 계획하고 있다¹⁶. 마지막으로 이 논문은 기존의 빔 직경을 측정하지 않고 집속이온빔 업체에서 참고 데이터로 제공한 빔 직경을 사용하여 수행한 다른 실험에 정밀한 실험을 수행하기 위해 중요한 자료가 될 것이라 기대한다.

후 기

이 논문은 2010 년도 동서울대학교 산업기술연구소의 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- Ivor, I. and Julius, J. M., "The Physics of Micro/Nano-fabrication," Plenum Press, 1992.
- Kaesmaier, R. and Loschner, H., "Ion Projection Lithography: Progress of European MEDEA & International Program," Microelectron. Eng., Vol. 53, No. 1, pp. 37-45, 2000.
- Frey, L., Lehrer, C. and Ryssel, H., "Nanoscale Effects in Focused Ion Beam Processing," Appl. Phys. A, Vol. 76, No. 7, pp. 1017-1023, 2003.
- Vasile, M. J., Xie, J. and Nassar, R. J., "Depth control of focused ion-beam milling a numerical model of the sputtered process," J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 17, No. 6, pp. 3085-3090, 1999.
- Tseng, A. A., "Recent Developments in Micromilling using Focused Ion Beam Technology," J. Micromech. Microeng., Vol. 14, No. 4, pp. R15-R34, 2004.
- Orloff, J., "Handbook of Charged Particle Optics," CRC Press, Boca Raton, pp. 129-160, 2009.
- Kim, H. B., Hobler, G., Steiger, A., Lugstein, A. and Bertagnolli, E., "Level set approach for the simulation of focused ion beam processing on the micro/nano scale," Nanotechnology, Vol. 18, No. 26, pp. 265307-265313, 2007.
- Kim, H. B., Hobler, G., Steiger, A., Lugstein, A. and

- Bertagnolli, E., "Full three-dimensional simulation of focused ion beam micro/nanofabrication," *Nanotechnology*, Vol. 18, No. 24, pp. 245303-245311, 2007.
9. Orloff, J., "Handbook of Charged Particle Optics," CRC Press, pp. 549-552, 2009.
 10. Ward, J. W., Utlaut, M. W. and Kubena, R. L., "Computer simulation of current density profiles in focused ion beams," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 5, No. 1, pp. 169-174, 1987.
 11. Harriott, L. R., "Beam-size measurement in focused ion beam systems," *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 8, No. 2, pp. 899-901, 1990.
 12. Ben Assayag, G., Vieu, C., Gierak, J., Sudraud, P. and Corbin, A., "New characterization method of ion current-density profile based on damage distribution of Ga⁺ focused-ion beam implantation in GaAs," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 11, No. 6, pp. 2420-2426, 1993.
 13. Lugstein, A., Basner B., Hobler, G. and Bertagnolli, E., "Current density profile extraction of focused ion beams based on atomic force microscopy contour profiling of nanodots," *J. Appl. Phys.*, Vol. 92, No. 7, pp. 4027-4042, 2002.
 14. Patterson, N., Adams, D. P., Hodges, V. C., Vasile, M. J., Michael, J. R. and Kotula, P. G., "Controlled fabrication of nanopores using a direct focused ion beam approach with back face particle detection," *Nanotechnology*, Vol. 19, No. 23, pp. 235304-235313, 2008.
 15. Fu, Y. and Bryan, N., "Fabrication of three-dimensional microstructures by two-dimensional slice by slice approaching via focused ion beam milling," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 22, No. 4, pp. 1672-1678, 2004.
 16. Lee, H. W., Han, J., Min, B. K. and Lee, S. J., "Simulation of focused ion beam processes for micro-nano machining," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 25, No. 3, pp. 44-49, 2008.