

이온빔을 이용한 마이크로/나노 가공: 형상가공

김흥배[#], Gerhard Hobler^{*}

Ion Beam Induced Micro/Nano Fabrication: Shape Fabrication

Heung-Bae Kim[#] and Gerhard Hobler^{*}

ABSTRACT

Focused ion beams are a potential tool for micro/nano structure fabrication while several problems still have to be overcome. Redeposition of sputtered atoms limits the accurate fabrication of micro/nano structures. The challenge lies in accurately controlling the focused ion beam to fabricate various arbitrary curved shapes. In this paper a basic approach for the focused ion beam induced direct fabricate of fundamental features is presented. This approach is based on the topography simulation which naturally considers the redeposition of sputtered atoms and sputtered yield changes. Fundamental features such as trapezoidal, circular and triangular were fabricated with this approach using single or multiple pass box milling. The beam diameter(FWHM) and maximum current density are 68 nm and 0.8 A/cm², respectively. The experimental investigations show that the fabricated shape is well suited for the pre-designed fundamental features. The characteristics of ion beam induced direct fabrication and shape formation will be discussed.

Key Words : Focused Ion Beam (집속이온빔), Nano Fabrication (나노가공), Simulation (전산해석), Redeposition (재증착), Sputtering (스퍼터링)

1. 서론

정밀 기계공학에서의 나노가공은 일반적으로 전자(Electron), 광자(Photon), 그리고 이온(Ion) 등을 이용한 직접가공(Direct patterning)과 표면에 레지스트(Resist)를 도포하여 가공하는 간접가공으로 나뉘어질 수 있는데, 이 중에서 이온을 이용하면 나노영역에서 포토레지스트 없이 직접가공을 통하여 원하는 형상을 제작할 수 있다. 또한 이온을 이용하면 다양한 재료에 고 중횡비(Aspect ratio) 형상을 제작할 수 있어 많은 응용분야에 활용되고 있다.¹

대표적으로 마이크로 렌즈(Lens) 또는 렌즈 어레이(Array), 그리고 회절격자(Diffractive grating) 등이 있으며, 렌즈의 경우 정밀한 렌즈를 실리콘을 이용하여 가공한 결과가 보고되었다.²

전자 또는 광자를 이용한 직접가공이 열가공(Thermal process)인 것에 비해 이온빔을 이용한 직접가공의 특징은 이온의 질량이 다른 입자에 비해 상대적으로 크므로 입자의 충돌을 통한 모재원자의 물리적인 에너지 전달에 기인한다.³ 이 입자간 충돌로 인하여 모재의 원자는 떨어져 나오게 되고 이를 스퍼터링(Sputtering)이라 하며 떨어져

접수일: 2006 년 10 월 23 일; 게재승인일: 2007 년 8 월 1 일

교신저자: 비엔나공과대학 전자공학과

E-mail: ccadcam@korea.com Tel. 43 (1) 58801-45121

* 비엔나공과대학 전자공학과

나온 원자의 일부는 다시 모재의 일부에 증착되는데 이를 재증착(Redeposition)이라 한다. 재증착으로 인하여 이온빔 가공은 그 형상을 예측하기 어려우며 다양한 형상을 제작하는데 극복해야 하는 문제로 지적되고 있다.¹ 또한 이온빔 가공은 입사각도의 종류와 에너지, 모재의 종류, 입사각도 그리고 온도 등의 다양한 가공변수에 따라 스퍼터율이 달라지므로 이로 인하여 독특한 가공특성을 나타내고, 가공 스케일이 주로 미소구조이기 때문에 실험을 통한 가공특성 연구가 상당히 어려운 실정이다.

집속이온빔 가공에 관한 기초연구는 80년대 초부터 시작하였으며, 많은 연구그룹 및 연구자들에 의해 집속이온빔을 이용한 국부영역으로의 마스크 없는 이온주입(Implantation), 고 분해능 리소그래피(Lithography) 및 반도체 구조 개선용으로 사용될 수 있음이 알려졌다.

최초의 집속이온빔 가공에 관한 연구는 1982년 Hughes 연구소에서 Kubena⁴ 등에 의해 발표되었으며, 싱글패스 가공으로 V 형 채널을 형성할 수 있음을 발견하였다. 이는 가우스 분포(Gaussian distribution)로 입사하는 빔에 의해 가공 초기의 부드러운 형상이 가공이 진행됨에 따라 재증착 플럭스(Flux) 및 측면에서 반사된 이온들에 의한 자체 집속(Self-focusing) 효과에 기인하여 V 형으로 발전된 것이다. Yamaguchi⁵ 등은 가공 중 가공방법과 가공량의 연관성을 연구하여 재증착에 의하여 종횡비가 1 을 넘으면 가공량이 작아진다는 것을 발견하였고 나아가 싱글패스에 비해 멀티패스 가공에서는 재증착 플럭스를 피할 수 있어 가공량이 증가하며 이로 인해 가공 깊이가 더 깊은 채널을 형성할 수 있다는 것을 발표하였다. Itoh⁶ 등은 단일 구멍 가공에서 재증착에 대한 연구를 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 스퍼터링과 재증착에 관한 단순한 수학적 모델은 Ishitani⁷ 등에 의해 1991 년에 발표되었다. Harriott⁸ 은 모재에 충돌한 이온들이 연속적인 충돌을 통하여 에너지를 모두 잃는 조건에서 스퍼터율이 증가하는 것을 알아냈고 Ga⁺의 경우 20-50 keV 사이의 입사에너지 값에서 스퍼터율이 최대가 됨을 알아냈으며, Xu⁹ 등은 입사각도와 스퍼터율의 상관관계를 연구하였다. 일반적으로 입사각이 증가함에 따라 스퍼터율도 증가하지만 약 70-80° 사이에서 최대가 되며, 이후의 입사각도 증가에 대해서는 스퍼터율이 감소하는 경향을 보인다. 이는 높은 입사각에서 입사된 이온

들의 모재 표면에서의 반사로 인한 것이다.

또한 Young¹⁰ 등은 이온빔의 전류와 직경이 이온빔 가공에서 중요하다는 것을 발표하였는데, 일반적으로 이온빔의 직경은 이온빔 전류와 함수관계이므로 전류가 감소하면 빔의 직경이 작아지고 가공 분해능이 좋아지는 장점이 있으나 가공시간이 길어지는 단점이 있다. 또한 전류가 감소하면 전류밀도와 공간방전(Space charge)이 감소하므로 빔의 집속도 또한 증가하게 된다. Driesel¹¹ 은 재증착을 줄이고 최적의 가공조건을 가지는 조건을 제시하기도 하였다.

이온빔을 이용한 정밀한 형상가공에 관한 연구 중 많은 부분이 Vasile¹² 등에 의해 이루어졌으며, 일정영역을 원하는 형상으로 가공하기 위하여 각 픽셀 마다 입사하는 이온량을 달리하여 가공하는 방법을 발표하였으며, Adams¹³ 등은 이 방법을 개선하여 더 정밀한 가공을 수행할 수 있는 방법을 연구하였다. 또한 원하는 형상을 가공하기 위하여 Fu¹⁴ 등은 "Slice by Slice" 방법을 발표하였는데, 이 방법에서 일정한 3 차원 형상가공은 가공 깊이가 방향으로 일정한 두께로 나누어 가공이 수행된다. 따라서 더 많은 수로 나누어 가공을 수행할 경우 형상의 정밀도는 증가한다고 보고하였다. 그러나 위에 열거한 방법들은 모두 재증착 플럭스를 고려하지 않았기 때문에 종횡비가 1 보다 작은 형상의 경우에는 적용할 수 있으나, 종횡비가 큰 형상의 경우에는 재증착 플럭스의 영향이 증대되므로 적용할 수 없다.

또한 Bradley¹⁵ 등은 집속이온빔을 이용한 가공 중에 자동적으로 특정 형상이 형성되는 것을 발견하고 이를 "Self-organized formation" 이라고 발표하였고 이에 대한 많은 연구를 수행하였다. 후에 Fu¹⁶ 등이 이 방법을 이용하여 회절격자를 제작하는데 이용하였다. 그러나 이 방법 또한 원하는 형상을 가공하기 위한 가공조건을 찾기 어렵고 정밀한 가공을 위해 가공조건을 변경할 경우 많은 실험을 통한 시행착오의 방법에 의존해야 하므로 실제 형상가공에는 적용하기 어렵다는 문제가 있다.

이번 연구에서는 기본형상(Fundamental feature)을 정의하고 이를 가공하는 접근방법을 제시하였으며, 가공 시 발생하는 형상가공 특성에 대해 연구하였다. 이 방법은 시뮬레이션을 기반으로 하는 접근방법이므로 실험을 기반으로 한 접근방법에 비해 시간을 절약할 수 있는 효율성을 기대할 수

있다. 또한 시뮬레이션에서 재증착 플럭스 및 입사각에 따른 스퍼터율의 변화를 자연스럽게 포함하므로 재증착으로 인한 형상의 오류를 피할 수 있는 장점이 있다. 이 논문에서는 기본적인 형상들과 실험방법에 대해서는 2장에서 그리고 가공된 형상들 및 그 특성에 대해서는 3장에서 논의한다.

2. 접근방법 및 실험

2.1 접근방법 및 가공형상

일반적으로 집속이온빔을 이용한 형상가공에서는 Table 1에 있는 가공변수(Process parameter)에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이번 연구에서는 서로 인접한 두 픽셀간의 간격으로 정의되는 픽셀간격(Pixel spacing, P_s), 집속이온빔의 스캔평면에서 X 및 Y 방향으로의 픽셀 수(또는 스캔라인의 수) 그리고 가공에 사용한 전체 이온량을 지칭하는 이온도즈(Dose) 또는 면적당 이온량을 지칭하는 플루언스(Fluence) 등 네 가지 가공변수를 변경하여 원하는 기본형상을 가공하는 방법을 연구하였다.

Table 1 Process parameters and related brief description

Process parameter	Description
Scanning strategy	Raster or serpentine scan
Pixel spacing (P_s)	Distance between two pixels
Number of pixels	The number of pixels
Dose (or Fluence)	The number of total ions (or ions per unit area)

접근방법은 우선 집속이온빔의 가공 중 특정형상이 자연스럽게 형성되는 원리를 이용하여 원하는 형상가공 능력을 판단한 후, 정밀한 형상가공을 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 접근방법을 통하여 정확한 가공변수들을 정하는 것이다. 이 방법으로 기존의 Vasile¹² 및 Fu¹⁶ 등의 논문들과 다르게 형상을 정밀하게 제어할 수 있으며, 시뮬레이션을 통하여 재증착을 고려하였으므로 형상의 오류를 최소화할 수 있다. 특히 중형비가 1보다 크거나 또는 중형비가 작더라도 재증착의 영향이 두드러지는 형상에 유리한 장점이 있다.

기본적인 형상으로 Fig. 1에 보여지는 것과 같이 사다리(Trapezoidal), 삼각(Triangular), 원(Circular),

사인(Sinusoidal) 및 포물선(Parabolic) 형상들을 선택하였다. 이러한 형상들을 정의한 이유는 가장 일반적인 기본형상이며, 렌즈(Lens) 및 회절격자와 같은 광학부품(Optical part)에 많이 사용하는 형상이기 때문이다.^{17, 18} 형상은 한쪽 방향으로 전체길이에 걸쳐 균일한 단면을 가지는 2½차원으로 정의하였으며, 정의된 단면형상을 정밀하게 가공하는 것을 목표로 한다.

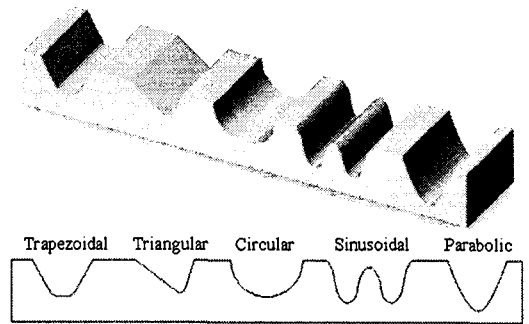


Fig. 1 Illustration of defined fundamental features

2.2 실험

실험에 사용한 집속이온빔 장비는 이중렌즈(Twin-lens)를 장착한 Micrion 2500으로 Ga⁺을 액체 금속 이온원(Liquid-metal ion source)을 이용하여 추출하며, 50 kV의 전압에서 50 μm 어퍼처(Aperture)를 이용하여 가속하여 45 pA의 빔 전류를 형성한다. 이때 FWHM(Full width at half maximum)으로 정의되는 빔 직경(Beam diameter)과 전류밀도(Current density)는 각각 68 nm와 0.8 A/cm²이며, 스캔방법(Scanning strategy)은 각 라인의 시작 위치가 이전 스캔라인의 끝 위치와 연결하여 스캔이 이루어지는, 즉 지그재그(Zigzag) 형태의 serpentine 스캔방법을 사용하였다. 이 방법을 사용할 경우 각 픽셀에서의 드웰타임이 크더라도 가공방향이 각 라인마다 바뀌므로 한 방향으로만 가공이 이루어지는 raster 스캔방법보다 형상을 비교적 쉽게 제어할 수 있다.

실험에 사용된 집속이온빔 장치의 내부 도식과 장비의 사진이 Fig. 2에 보여지고 있다. 추가적인 가스공급을 통하여 가스 에칭(Gas Assisted Etching, GAE)과 이온빔 증착(Ion Beam Induced Deposition, IBID) 등을 수행할 수 있다.

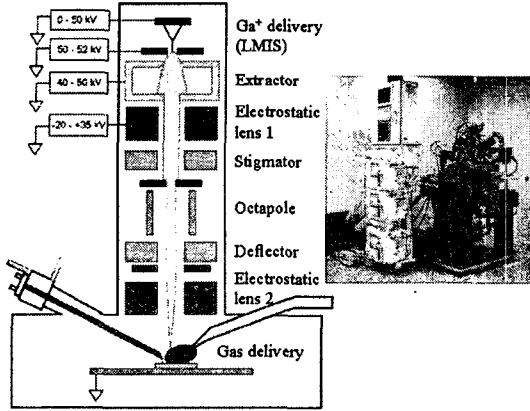


Fig. 2 Schematic diagram and photography of Micrion 2500 FIB system

3. 집속이온빔 형상 가공

3.1 멀티패스 가공 (Multi pass fabrication)

3.1.1 사다리꼴 형상 (Trapezoidal feature)

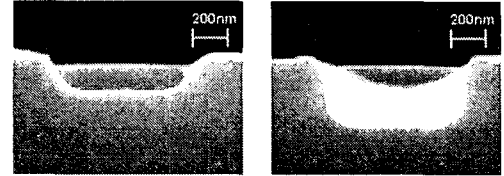
집속이온빔을 이용한 사다리꼴 형상의 가공은 박스밀링을 통하여 쉽게 이루어질 수 있다. 박스밀링이란 원하는 영역의 사각형 영역을 지정한 후 원하는 이온을 투입하여 가공하는 것을 의미하는 것으로, 가공 중 측면 및 바닥에서 발생된 재증착 플럭스의 영향으로 가공형상은 V 형 채널로 변하게 된다.⁴ 이때 사다리꼴 형상의 입구치수는 식 (1)에 의하여 픽셀 수와 픽셀간격에 의해 정의된다.

$$w = (n-1)p_s + d_f \quad (1)$$

여기서 w 는 입구의 폭, p_s 는 픽셀간격, d_f 는 빔 직경 그리고 n 은 픽셀의 수를 나타내며, 이번 실험에서는 20×50 픽셀을 50% 중첩하여 사다리꼴 형상을 가공하였다.

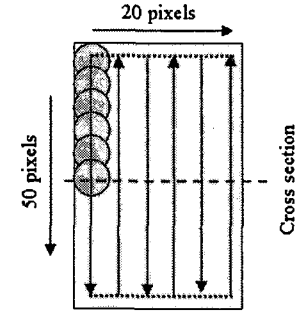
박스밀링을 이용하여 가공한 사다리꼴 단면의 전자현미경(SEM) 사진, 단면위치를 포함하는 가공 방향 및 시뮬레이션 결과가 Fig. 3의 (a)-(d)에 보여지고 있다. 이온 플루언스는 Fig. 3(a) 및 (b) 각각에 대하여 0.5×10^{18} ions/cm² 및 1.0×10^{18} ions/cm² 였으며, 가공 초기의 측면 기울기 및 바닥과 측면 사이에 이루어지는 라운드 형상은 빔 직경에 의해 큰 영향을 받으며 픽셀간격 등에 의해서도 영향을 받는다. 이온량이 증가하여 가공이 진행됨에 따라 사다리꼴 형상의 바닥 넓이가 줄어들게 되는 것을 Fig.

3(d)의 시뮬레이션 결과를 통해서 알 수 있다.

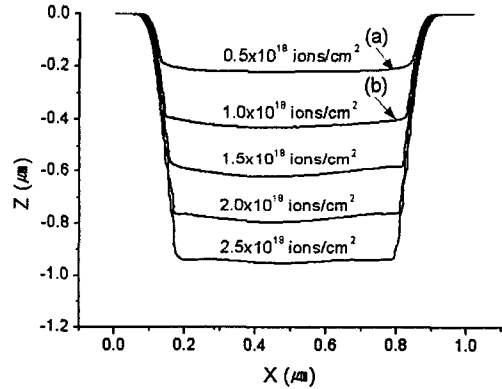


(a) 200 nm

(b) 400 nm



(c)



(d)

Fig. 3 Trapezoidal feature fabricated by box milling with multi passes. FIB exposure with 50 keV Ga⁺ ions and an ion fluencies of 0.5×10^{18} ions/cm² (a) and 1.0×10^{18} ions/cm² (b). Schematic illustration of scanning strategy and the cross section position (c). The value below at each image is the measured maximum depth

3.1.2 원, 사인 및 포물선 형상 (Circular, sinusoidal and parabolic features)

집속이온빔에서 하나 또는 두 픽셀을 이용하여 멀티패스로 박스가공을 수행할 경우, Fig. 4에 보여지는 것과 같이 원, 사인 및 포물선 형상이

형성된다. 첫 번째 열은 하나의 픽셀을 이용하여 가공한 것이고, 두 번째 열은 두 픽셀을 50% 중첩하여 가공한 것이다. 픽셀 드웰타임은 0.0001 ms였으며, 15,000 부터 35,000 까지 5,000 씩 패스를 증가하여 가공하였다.

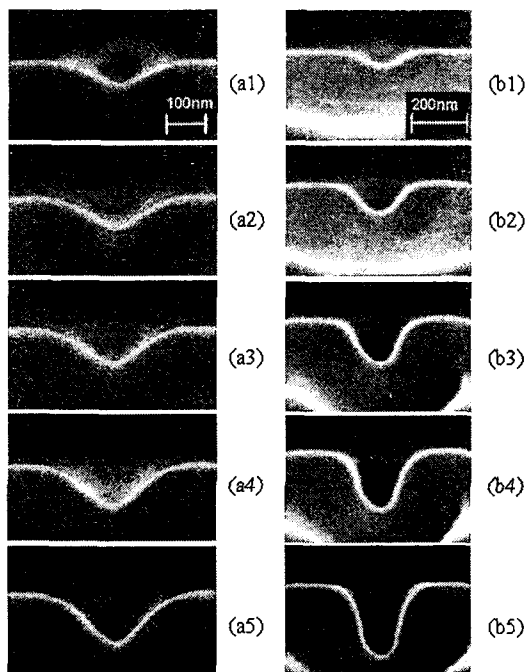


Fig. 4 SEM images of circular, sinusoidal and parabolic features; the column (a) and (b) were formed by one and two pixels, respectively. The number of passes were 15,000(1st row), 20,000(2nd row), 25,000(3rd row), 30,000(4th row), 35,000(5th row) with dwell time of 0.001 ms

가공 형상은 초기에 가우스(Gaussian) 형상의 빔에 따라 원형에서 이온 플루언스가 증가함에 따라 가공 깊이가 증가하고 사인 및 포물선 형상으로 변화된다. 시뮬레이션 결과가 Fig. 5 에서 보여지고 있는데, 0.0001 ms 의 드웰타임과 20,000 번의 패스로 가공한 실험결과 및 시뮬레이션 결과가 반지름이 67 nm 인 반원에 거의 일치하는 것을 알 수 있으며, 이온 플루언스를 증가시킬 경우 사인 및 포물선에 가깝다는 것을 Fig. 4(b4)와 (b5)를 통해 알 수 있다.

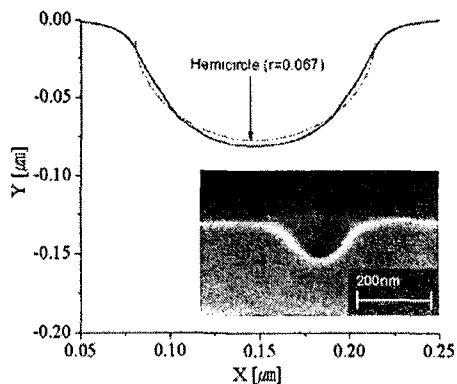


Fig. 5 Comparison between simulation result and hemi-circle with radius of 67 nm. The experimental result was fabricated by 2 scan lines and total 20000 passes with dwell time of 0.0001 ms

3.2 싱글패스 가공(Single pass fabrication)

집속이온빔을 이용한 싱글패스 가공을 수행하기 위하여 Table 2 와 같은 픽셀 수, 드웰타임 그리고 픽셀간격을 이용하여 가공을 수행하였다. Fig. 6(a)에 보여지는 바와 같이 30 픽셀을 가공한 후 좌측에서 우측으로 Serpentine 스캔방법으로 가공하여 중앙단면을 전자현미경으로 검사하였다.

Table 2 Process parameters and experimental range

Parameter	Range
Number of scan lines	6, 8, 10 and 12 lines
Dwell time	3, 5, 7, 9 and 11 ms
Pixel spacing	40.8 nm (40% overlap) 34.0 nm (50% overlap) 27.2 nm (60% overlap)

앞 절에서 이미 집속이온빔에서 박스밀링 가공 중 멀티패스 대신 싱글패스로 가공할 경우 이온 플루언스가 동일하다 하더라도 그 가공 형상은 다르다는 것을 언급하였다. 단면을 가로지르는 방향으로 10 픽셀 및 27.2 nm 의 픽셀 간격으로 가공한 것이 Fig. 6 에 보여지고 있는데, 드웰타임이 증가할수록, 즉 이온 플루언스가 증가할수록 가공 최대 깊이가 증가하는 것을 알 수 있다. 멀티패스와 다르게 평평한 바닥을 이루며 가공되는 것이 아니라 가공 진행방향으로 가공 깊이가 증가하면

서 그 형상이 삼각형으로 발전하는 것을 알 수 있다. 또한 전자현미경 사진에서 가공은 좌측에서 우측방향으로 이루어진 것으로, 우측 벽과 바닥은 약 70-80° 사이에서 입사각을 형성하게 되며, 이 각도 영역에서 스퍼터율은 최대가 되므로 가공 깊이가 증가하게 된다. 또한 우측 벽과 수직입사 사이에 이루어지는 높은 입사각도에 의한 스텝입사 (Glancing incidence)로 인하여 입사된 이온들은 우측 벽에서 입사에너지를 보유한 상태로 반사 (Reflection)되어 바닥으로 향하게 되고 이로 인한 2 차 가공으로 한쪽 바닥으로 가공 깊이가 증가하게 된다.

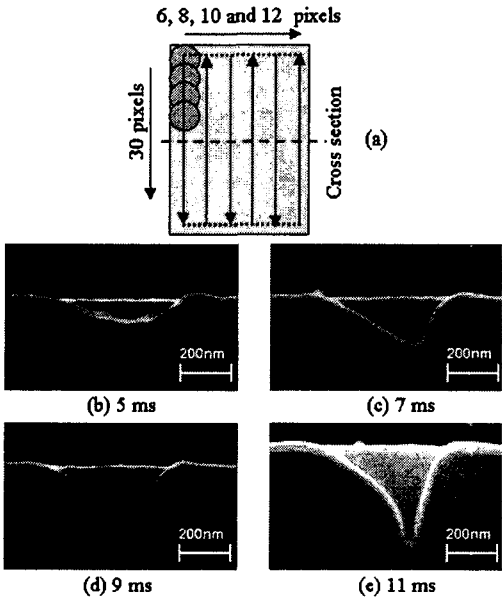


Fig. 6 SEM images of various triangular features fabricated by one pass box milling with the 30×10 pixels array (10 pixels were used to form width of triangular feature with 60 % overlap corresponds to pixel spacing of 27.2 nm). The value below at each image is the dwell time

재증착의 경우, 가공 깊이가 증가할수록 스퍼터 되어 모재를 탈출한 원자들은 좁아진 가공영역을 벗어나지 못하고 양 측벽에 재증착 되는데, 가공이 진행될수록 좌측의 벽에서는 빔의 영역에서 벗어나게 되어 스퍼터링이 발생되지 않는다. 이런 상태에서 우측 벽에서 발생한 재증착의 영향을 받으므

로 Fig. 6 의 (d)와 (e)에서 보여지는 것과 같이 점 점 부풀어오르는 것을 알 수 있다.

Fig 7 은 실험에서 구한 삼각형상의 최대 깊이를 드웰타임과 픽셀오버랩에 따라 변화하는 경향을 보여주고 있다. 가공 깊이는 드웰타임이 증가할수록 비선형적으로 증가하게 되는데, 이때 픽셀 오버랩이 크면 그 증가치는 더욱 커지는 것을 알 수 있다. 또한 픽셀의 수가 증가할수록 가공 깊이가 계속 증가할 것 같은 예상과 달리 가공 깊이는 8 픽셀에서 최대를 나타냈다. 이는 가공 깊이가 깊어지면 최대 깊이에서의 폭이 좁아지고 재증착 플럭스에 의해 그 좁은 폭이 영향을 받아 이루어지는 것을 Fig. 6(e)의 최대 깊이에서 형성된 좁은 폭을 통해서 알 수 있다.

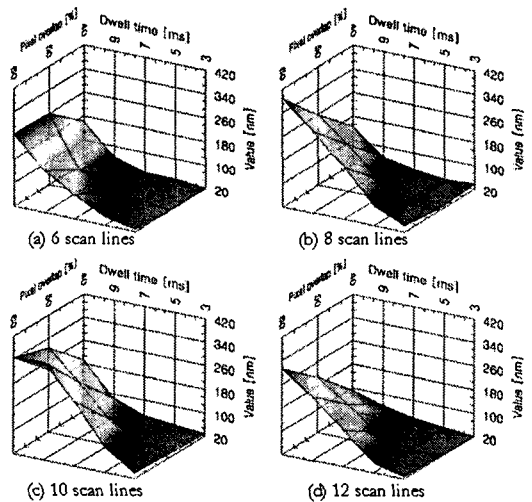


Fig. 7 Three-dimensional graphs of experimentally measured maximum depth vs. dwell time and pixel overlap. The number of scan lines was 6, 8, 10 and 12 for (a), (b), (c) and (d), respectively

회절격자와 같은 광학부품의 경우 삼각형상은 입사된 빔을 일정한 각도로 충분한 효율을 가지고 회절시킬 때 이용된다. 이때 삼각형상 중 측벽이 평평한 회절격자를 사용하는 것이 유리한데, Fu¹⁶의 실험에서는 이러한 회절격자를 형성하기 위한 방법으로 실험적으로 접근하는 시행착오 방법만을 제시하였으며 원하는 형상을 만들기에는 어려움이 있다. 원하는 형상을 가공하기 위해서 시뮬레이션

방법을 이용할 경우 많은 시간과 비용을 줄일 수 있으며 나아가 정확한 가공변수를 정할 수 있다.

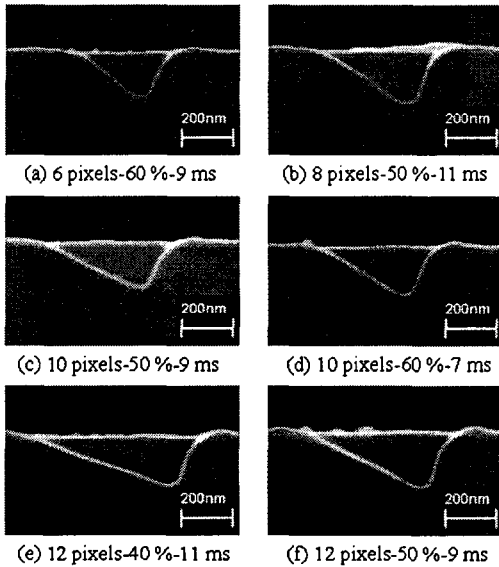


Fig. 8 SEM images of various triangular features fabricated by one pass box milling. The values below at each image are the number of pixels-pixel overlap-dwell time in sequence

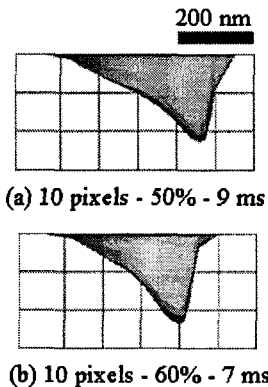


Fig. 9 Results of the three-dimensional simulation. Simulation (a) and (b) represent the experimental results corresponding to Fig. 8 (c) and (d), respectively

이를 위하여 실험과 같은 조건으로 3 차원 시뮬레이션을 수행하였고, 원하는 폭과 깊이 등을 가지는 삼각형상을 가공하기 위한 변수들을 구하였다.

가공을 통하여 얻어진 평평한 측벽을 가지는 삼각형 형상들이 Fig. 8 에 보여지고 있으며, Fig. 9 에는 Fig. 8(c)와 (d)에 해당하는 3 차원 시뮬레이션 결과가 보여지고 있다.¹⁹

이러한 접근 방법은 복잡한 형상에 대해서도 사용할 수 있으며, 추후 이러한 접근 방법을 체계적으로 확립하기 위한 연구가 진행될 것이다. 정밀한 형상의 가공은 마이크로 및 나노영역에서 많은 응용분야를 확보할 수 있는 필수적인 기술이므로, 각 분야의 요구를 충족하기 위해 다양한 재료에 대한 가공특성 분석 및 형상가공 기술에 대한 연구가 필요하다.

4. 결론

이온빔의 이용은 마이크로 및 나노스케일 영역에서 정밀한 가공을 수행하기 위해 필수적인 기술이다. 그럼에도 불구하고 이온빔을 이용한 형상가공에 대한 연구가 미흡한 실정이었으나 이번 연구를 통하여 기초적인 접근방법 및 형상가공 특성을 소개하였다.

이온빔을 이용한 가공에서 형상의 정밀도는 다양한 변수에 의해 영향을 받는데, 특히 스퍼터 되어 탈출한 원자들에 의한 재증착 문제와 입사각도에 따라 변화되는 스퍼터율이 가장 큰 문제로 지적되고 있다. 이번 연구에서는 시뮬레이션 기반의 접근을 통하여 재증착 및 스퍼터율의 변화까지 고려한 방법을 소개하였으며, 이 접근방법을 이용하여 사다리꼴, 원형 및 삼각형 형태 등의 기본적인 형상들을 가공하였다. 가공된 형상들을 통하여 이러한 접근방법이 다양한 형상을 가공하는데 적용될 수 있음을 알았다. 이러한 접근을 통해 가공된 형상들은 나노 임프린트(Nanoimprint) 스탬프(Stamp) 등에 사용하여 더욱 정밀한 부품의 대량 생산에 적용할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

1. Ivor, I. and Julius, J. M., "The Physics of Micro / Nano-Fabrication," Plenum Press, 1992.
2. Fu, Y. and Bryan, N. K., "Semiconductor Microlenses Fabricated by One-Step Focused Ion Beam Direct Writing," IEEE Trans. SemiconManu., Vol. 15, No. 2, pp. 229-231, 2002.

3. Gianuzzi, A. L. and Stevie, F. A., "Introduction to Focused Ion Beams," Springer, 2005.
4. Kubena, R. L., Sleiger, R. L. and Stevens, E. H., "High resolution sputtering using a focused ion beam," *Thin Solid Film*, Vol. 92, Issue 1, pp. 165-169, 1982.
5. Yamaguchi, H., Shimase, A., Haraichi, S. and Miyauchi, T., "Characteristics of silicon removal by fine focused ion beam," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 3, Issue 1, pp. 71-82, 1985.
6. Itoh, F., Shimase, A. and Haraichi, S., "Two-dimension profile simulation of focused ion beam milling of LSI," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 137, Issue 3, pp. 983-988, 1990.
7. Ishitani, T. and Ohnishi, T., "Modeling of sputtering and redeposition in focused-ion-beam trench milling," *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 9, Issue 9, pp. 3084-3090, 1991.
8. Harriott, L. R., "Micro focused ion beam applications in microelectronics," *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 36, Issue 1, pp. 432-439, 1989.
9. Xu, X., Ratta, A. D. D., Sosonkina, J. and Melngailis, J., "Focused ion beam induced deposition and ion milling as a function of angle of ion incidence," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 10, Issue 6, pp. 2675-2683, 1992.
10. Young, R. J., "Micro-machining using a focused ion beam," *Vacuum*, Vol. 44, Issue 3, pp. 353-362, 1993.
11. Driesel, W., "Micromachining using focused ion beams," *Physica Status Solidi*, Vol. 146, Issue 1, pp. 523-530, 1994.
12. 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, Issue 6, pp. 3085-3090, 1999.
13. Adams, D. P. and Vasile, M. J., "Accurate focused ion beam sculpting of silicon using a variable pixel dwell time approach," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 24, Issue 2, pp. 836-844, 2006.
14. Fu, Y. and Bryan, N. K. A., "Fabrication of three-dimensional microstructures by two-dimensional slice by slice approaching via focused ion beam milling," *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 22, Issue 4, pp. 1672-1678, 2004.
15. Bradley, R. M. and Harper, J. M. E., "Theory of ripple topography induced by ion beam bombardment," *J. Vac. Sci. Technol. A*, Vol. 6, Issue 4, pp. 2390-2395, 1988.
16. Fu, Y., Bryan, N. K. A. and Zhou, W., "Self-organized formation of a blazed-grating-like structure on Si(100) induced by focused ion-beam scanning," *Opt. Express*, Vol. 12, Issue 2, pp. 227-233, 2004.
17. Hecht, E., "OPTICS," 4th Edition, Addison Wesley Longman Inc., 2002.
18. Fisher, R. E. and Caleb, B. T., "Optical system design," McGraw-Hill, 2000.
19. Kim, H. B. and Hobler, G., "Ion beam induced micro/nano fabrication: Modeling," *J. KSPE*, Vol. 24, No. 8, pp. 108-115, 2007.