

# 이온빔을 이용한 마이크로/나노 가공: 모델링

김흥배<sup>#</sup>, Gerhard Hobler<sup>\*</sup>

## Ion Beam Induced Micro/Nano Fabrication: Modeling

Heung-Bae Kim<sup>#</sup> and Gerhard Hobler<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

3D nano-scale manufacturing is an important aspect of advanced manufacturing technology. A key element in ability to view, fabricate, and in some cases operate micro-devices is the availability of tightly focused particle beams, particularly of photons, electrons, and ions. The use of ions is the only way to fabricate directly micro-/ nano-scale structures. It has been utilized as a direct-write method for lithography, implantation, and milling of functional devices. The simulation of ion beam induced physical and chemical phenomena based on sound mathematical models associated with simulation methods is presented for 3D micro-/nanofabrication. The results obtained from experimental investigation and characteristics of ion beam induced direct fabrication will be discussed.

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

### 1. 서론

21 세기는 지난 세기 후반부에 크게 발전했던 반도체 기술을 나노공학으로 연장해야 하는 기로에 있으며, 나노공학은 이번 세기에 가장 중요한 기술로 꼽히고 있다. 나노공학의 핵심은 리소그래피(Lithography), 즉 나노 패터닝(Nano patterning) 기술이며, 이를 달성하기 위해서 이미 한계점에 이른 광 리소그래피의 대체 수단으로 전자빔, 이온빔 및 13.5 nm 파장 영역의 빛을 이용하는 극 자외선 리소그래피(EUVL) 기술이 연구되고 있으며, 대량 생산에 적합한 나노 임프린트 리소그래피(Nano Imprint Lithography, NIL) 기술들이 연구되고 있

다.<sup>1</sup> 이중에서 이온빔은 유일하게 나노영역에서 마스크리스(Maskless) 레지스트리스(Resistless) 패터닝을 실현할 수 있는 기술이며, 이온프로젝션(Ion projection)<sup>2</sup> 기술과 현재 다양한 정밀가공 분야로 그 적용 범위를 확대하고 있는 집속이온빔(Focused Ion Beam, FIB) 및 플라즈마를 이용한 이온 밀링기 등에서 사용되고 있다.

집속이온빔의 경우, 현재 4 nm 정도의 빔 직경을 실현할 수 있는 장비도 개발되었으며 기계공학에서 MEMS/NEMS 및 정밀가공 분야에서 적용범위를 확대해나가고 있다. 그러나 에너지를 가지고 입사하는 이온빔과 고체의 상호작용에 의한 이온빔 가공은 일반 가공과는 다른 독특한 가공방식으

접수일: 2006 년 10 월 23 일; 게재승인일: 2007 년 6 월 7 일

<sup>#</sup> 교신저자: 비엔나공과대학 전자공학과

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

<sup>\*</sup> 비엔나공과대학 전자공학과

로 인하여 가공형상을 예측하기 어려우며, 이로 인하여 현재 기술로는 원하는 3 차원 곡면형상을 정밀하게 가공하는 것은 어렵다.

이온이 에너지를 가지고 고체에 입사하면 이온의 고체 침투에 의한 이온주입(Ion implantation), 그에 따른 고체 원자들의 방출에 의한 스퍼터링(Sputtering), 방출된 원자들에 의한 재증착(Redeposition), 입사한 이온의 입사각에 따른 고체 표면에서의 반사(Reflection), 고체에 침투한 이온의 후방산란(Backscattering), 그리고 후방산란 된 이온에 의한 2 차 스퍼터링과 더 나아가 2 차 스퍼터링 된 원자들에 의한 2 차 재증착 현상들이 주로 나타난다. 이중에서 이온빔 나노가공의 주 가공 메커니즘은 스퍼터링이고, 재증착 현상과 후방산란 된 이온들에 의한 2 차 가공이 현실적으로 가장 큰 문제점으로 지적되고 있다. 따라서 이온빔으로 원하는 형상의 3 차원 구조물을 가공하기 위한 대안으로 가공 메커니즘의 명확한 이해와 시뮬레이션(Simulation)에 의한 이온빔과 고체의 상호작용의 명확한 수치적 분석 및 더 나아가 이를 이용하여 재증착 문제를 해결하거나 가공 시뮬레이션을 통해 원하는 형상을 정밀 가공하는 방법을 개발하는 것이 가장 현실적이다. Tseng<sup>3</sup> 은 그의 논문에서 이온빔 가공에서 가공능률을 증가시키는 것과 소프트웨어를 통한 가공해석 및 입사의 위치에서의 가공능력 등이 집속이온빔이 범위를 더 확대하기 위해 반드시 필요한 연구라고 언급하였다.

이 논문에서는 이온빔 직접 가공을 모델링 하고 표면진화 시뮬레이션 기법을 이용하여 시뮬레이션 하였으며 이를 이용하여 마이크로 및 나노가공에서의 기본적인 가공 특성을 실험을 통하여 검증하고 분석하였다.

## 2. 장 이온-고체 상호작용과 이온빔 가공기

### 2.1 이온-고체 상호 작용

일반적으로 전하를 띠는 원자인 이온을 축출하는 하는 방법에는 Electron-impact ionization source, Plasmatrons, Liquid field-ionization source 와 같은 방법이 존재한다. 이렇게 발생되고 축출된 이온들은 적당한 전자기 렌즈나 전위차를 이용하여 집속하거나 가속하고 모재와 충돌시켜 원하는 가공을 수행한다.<sup>1</sup>

에너지를 가지고 모재에 입사한 이온들과의 상

호작용은 Fig. 1 에서 보여지는 것과 같이 우선 일부 입사한 이온이 모재 원자와의 충돌로 인하여 경로를 바꾸는 산란(Scattering) ①, 모재의 원자를 표면이나 내부에서 자리이동 시키는 전위(Dislocation) ②③, 모재 원자들을 모재 외부로 탈출시키는 스퍼터링(Sputtering) ④, 모재 속에 위치하는 이온주입(Implantation), ⑤, 모재표면에서 원자와 화학반응으로 새로운 표면 층을 생성하는 화학적 스퍼터링 (Chemical sputtering) ⑥, 모재에서 발생하는 오제이 전자(Auger electron)에 의해 중성화되는 경우 ⑦, 모재의 표면에 자리를 차지하는 경우 ⑧, 모재에서 2 차 전자를 발생시키거나 ⑨, 이로 인하여 이온화된 모재 원자가 방출되는 ⑩ 10 가지의 경우로 나타낼 수 있다.<sup>1</sup>

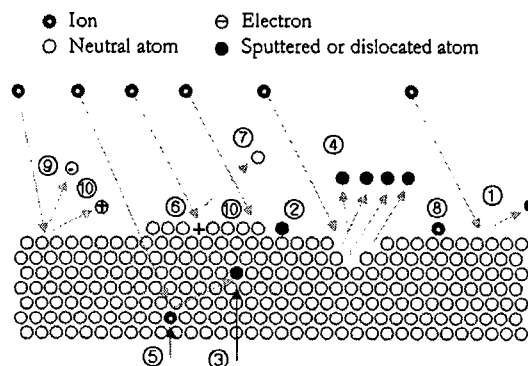


Fig. 1 Ion-solid interactions: ① ion-atom scattering, ② surface dislocation, ③ internal dislocation, ④ physical sputtering, ⑤ ion implantation, ⑥ chemical sputtering, ⑦ charge transfer, ⑧ ion adsorption, ⑨ electron emission, ⑩ ionized surface atom emission

### 2.2 이온빔 가공기

일반적으로 이온빔의 가공에서의 사용은 크게 집속이온빔과 이온밀링기이며 이 절에서는 이 두 이온빔 가공기에 대해 간략하게 소개한다.

집속이온빔은 일반적으로 액체금속 이온원을 사용하여 축출한 Ga<sup>+</sup>을 10-100 keV 의 영역에서 집속 및 가속하여 사용한다. 장비의 구성은 크게 이온원(Ion source), 이온광학계(Ion optic system), 빔편향기(Bema deflector) 그리고 작업테이블(Substrate stage)로 구성되어 있다. 액체금속 이온원에서 정전기력에 의해 축출된 이온들은 질량분리기(Mass

separator)를 통과하여 일정 질량의 이온들만이 통과하게 되고 원하는 방향으로 향하는 이온들을 유도관(Drift tube)를 통과시켜 제거한 후에 렌즈와 편향기를 이용하여 원하는 소재의 위치에 빔을 집속 시킨다. 기기의 내부의 진공도는  $10^{-7}$  torr 이하로 유지되어야 하며 소재 위에 MCP(Multi-channel plate)를 설치하여 2 차 전자를 모아서 가공 중에 SEM의 기능으로 소재를 관찰할 수도 있다. 집속되고 편향된 빔의 소재 위에서의 분포는 식 (1)과 같이 가우스 함수로 나타낼 수 있으며 빔의 직경은 FWHM(Full width at half-maximum)으로 표시한다.

$$D(r,0) = \frac{D_0}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\left(\frac{r}{\sigma\sqrt{2}}\right)^2\right) \quad (1)$$

여기서  $D_0$ 는 도즈상수(Dose constant)를,  $r$ 은 중심으로부터 반경방향의 거리를,  $\sigma$ 는 가우스 분포의 표준편차(Standard deviation)를 나타낸다.

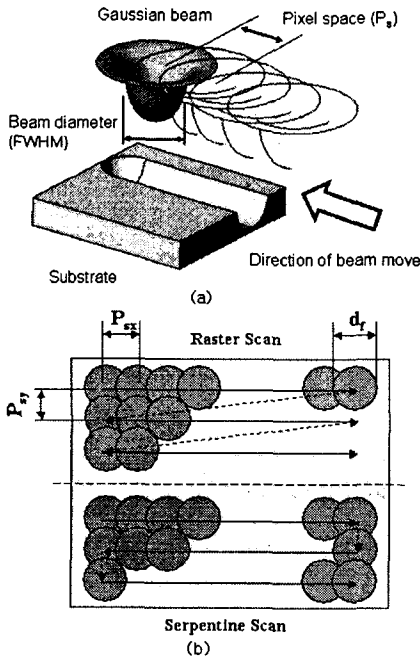


Fig. 2 Schematic illustrations of FIB processing

일반적으로 집속이온빔에서의 가공은 아날로그 방식과 디지털 방식으로 나뉘어지는데, 연속적으로 가공이 이루어지는 아날로그 방식과는 달리 디지털 방식은 가공을 원하는 형상을 일련의 픽셀로

디지털화하고 각각의 픽셀 위치에서 지정한 드웰 타임(Dwell time,  $t_d$ ) 동안 가공하게 된다. 이때 인접한 두 픽셀 사이의 거리를 지정하여 두 빔이 중첩되는 정도를 다양하게 변경할 수 있는데 이를 픽셀간격(Pixel spacing,  $p_s$ )라 한다(Fig. 2(a)). 각 픽셀의 가공은 raster 나 serpentine scan 방식으로 순차적으로 가공하게 되며, 두 방식의 차이는 Fig. 2(b)에서 보여지는 것과 같이 시작과 끝점의 연결성에 있다.

플라즈마 이온밀링기의 경우 주로  $Ar^+$  이온을 플라즈마(Plasma)로부터 추출하여 1 keV 이하의 에너지 영역에서 소재에 타격하여 가공을 수행하며 플라즈마 가공기, 플라즈마 에칭기(Etcher) 또는 이온 샤워기(Ion shower) 등의 이름으로 사용되며 일반적으로 이온 밀링기(Ion milling)라 호칭한다. 이온의 소재 위에서의 분포는 모든 영역에서 같은 분포를 가지므로 만일 가공면이 이상적인 평면이라면 가공면의 형상은 변하지 않는다.<sup>1</sup>

### 3. 시뮬레이션 방법

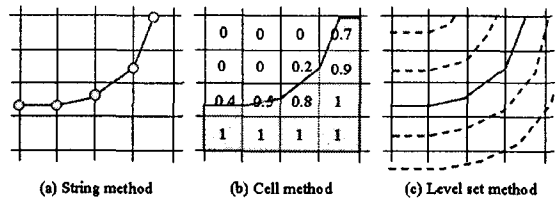


Fig. 3 Illustration of string, cell and level set method

외력에 의한 표면의 시간에 대한 변화나 물질 간의 경계에서 경계면의 변화를 시뮬레이션 하기 위해서 사용되는 방법으로는 현 방법(String method), 셀 방법(Cell method) 그리고 레벨셋 방법(Level set method)<sup>4</sup> 등이 있으며, 셀 방법의 경우 Fig. 3(b)와 같이 계산영역을 일련의 그리드로 나누고 각 그리드에 위치한 물질의 양을 일반적으로 0에서 1 사이의 값으로 초기화한 후 그 경계로 표면을 표시하게 된다. 그러므로 계단형상의 표면을 구성하게 되고 이를 부드러운 면으로 바꾸어 주어야 하며 기본적으로 범선 방향이나 곡률과 같은 시뮬레이션에 필수적인 표면정보를 정확히 구할 수 없다. 따라서 이번 연구에서는 셀 방법을 제외한 현과 레벨셋 방법을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 두 방법에 대해 간단히 소개한다.

### 3.1 현 방법

현 방법은 가장 고전적인 방법이며 Fig. 3(a)에 서와 같이 표면을 일련의 점들로 이산화(Discretization) 시키고 이 점들에서 외력이나 표면에서의 물리화학적 반응에 의한 변화량을 계산하며 2 차원의 경우 각 점들은 직선으로 3 차원의 경우 주로 삼각형을 이용하여 표면의 시간에 대한 변화를 표현하게 된다. 현 방법의 경우 각 점에서의 법선 방향이나 곡률과 같은 표면정보를 쉽게 계산할 수 있어 정확성이 좋고 계산 과정이 간결하기 때문에 일반적으로 많이 사용하고 있으나 표면들간의 접촉(Contact) 문제를 자연스럽게 처리할 수 없고 이산화로 나타나는 계산중의 작은 오류가 누적되어 나타나는 표면의 일그러짐이나 노이즈(Noise) 등을 제거해 주어야 한다. 또한 계산 중에 점들을 연결한 선들이 서로 겹쳐서 발생하는 루프(Loop)를 제거해 주어야 하며, 일정 길이 이상이나 이하의 선분을 제거하기 위해 점을 삽입하거나 제거해주어야 하는 문제가 있다.

### 3.2 레벨셋 방법

레벨셋 방법은 Osher and Sethian<sup>4</sup> 에 의해 개발되었으며, 기본적인 아이디어는 레벨 함수  $\phi(x, t)$ 의 제로 레벨(Zero level)을 이용하여 원하는 표면을 표현하는 것으로, 일정시간 후의 표면의 변화는 레벨함수를 포함하는 편미분방정식(Partial differential equation, PDE)으로 계산함으로써 구할 수 있다.

이온빔 프로세스를 포함하는 반도체 공정에서의 표면의 변화는 표면에 야기되는 속도  $F(x, t)$ 를 포함하여 식 (2)와 같은 형식의 편미분방정식으로 표현된다.

$$D_t \phi(x, t) + F(x, t)|\phi(x, t)| = 0 \quad (2)$$

레벨함수의 초기화는 계산구간을 고정간격으로 이산화한 후 레벨함수의 제로 레벨이 시뮬레이션 구조의 초기 위치에 오도록 Fig. 10(a)와 같이 음의 레벨함수 값이 내부에, 그리고 양의 레벨함수 값이 외부에 위치하도록 거리함수(Signed distance function)를 이용하여 초기화 한다.

가시도의 경우 Fig. 10(c)와 같이 두 점을 연결한 선분 중에 위치한 그리드 점들 중에서 레벨함수  $\phi$ 의 값을 계산하여 만일 음의 값을 가지면 가시도 0 인 것으로 판단한다. Fig. 10(c)에서 점 1 과 2 의 가시도는 각각 0 과 1 인 경우이다. 계산결과

의 신뢰성을 의해서 CFL (Courant-Friedrichs-Levy) 조건인 식 (3)를 만족하는 시간간격  $\Delta t$  를 선정하여 계산한다.

$$\Delta t \cdot F \leq \min(\Delta x, \Delta y, \Delta z) \quad (3)$$

또한 계산 영역 전체에 걸친  $F(x, t)$ 는 일반적으로 Fast marching method 를 이용하여 계산하는데, 계산의 정확성은 조금 떨어지지만 계산 시간을 줄이고자 할 경우 가장 가까운 제로 레벨 상에 있는 점의 값을 그대로 사용하거나 또는 Riemann-cell 방법을<sup>5</sup> 이용하여 계산 시간을 줄이면서 계산 결과의 정확성을 어느 정도 보장할 수 있다.

## 4. 시뮬레이션

### 4.1 시뮬레이션 모델

입사된 하나의 이온에 대한 스퍼터 된 모재원자의 비를 스퍼터율(Sputter yield) 이라고 하며 식 (4)과 같이 표시한다. 일반적으로 스퍼터율은 모재 및 이온의 종류, 가속전압, 입사각도, 온도 등 많은 가공변수에 따라 달라진다. 따라서 정확한 시뮬레이션을 위해서는 입사각도에 따른 스퍼터율을 구하는 것이 중요하다.

$$Y(\theta) = \text{sputtered atoms} / \text{incident ion} \quad (4)$$

이산화 된 3 차원 표면의 각 점에서의 전체 플럭스  $F_{total}$  는 모재 위에서 직접 입사한 이온 플럭스  $F_{incident}$  에 의한  $F_{direct}$  와 스퍼터 된 원자에 의한 재증착 플럭스  $F_{indirect}$  의 합으로 나타내며 일반적으로 서로 다른 부호를 가지며 식 (5), (6) 그리고 (7)와 같이 계산한다.

$$F_{total} = F_{direct} + F_{indirect} \quad (5)$$

$$F_{direct} = F_{incident} \times Y(\theta) \times \cos(\theta) \quad (6)$$

$$F_{indirect} = -S_c \int \frac{F_{direct} \times f_{3D}(\alpha) \times \cos(\beta)}{d^2} dA \quad (7)$$

Fig. 4 에서 보여지는 것과 같이  $\theta$  는 입사각으로 각 점에서 법선 방향과 입사각도 사이의 각이며,  $d$  는 스퍼터 지점과 원자들이 날아가 모재와 만나는 지점간의 거리,  $S_c$  는 부착계수 (Sticking coefficient),  $\beta$  는 모재에서 스퍼터 된 원자의 입사각과 그 점에서의 법선 방향 사이의 각,  $f(\alpha)$ 는 스퍼터 된 원자들의 분포 함수,  $\alpha$  는 스퍼터 된 원자

들의 방출각(Emission angle) 그리고  $dA$  는 각 점에서 미소면적을 의미한다.

각 점에서 표면의 이동속도는 전체 플럭스  $F_{total}$  를 식 (8)와 같이 모재의 원자밀도  $N$  으로 나누어 계산한다.

$$v = \frac{F_{total}}{N} \quad (8)$$

2 차원 시뮬레이션의 경우, 3 차원의 경우와 같은 식 (5)과 (6)를 사용하나 재증착에 의한 플럭스의 경우 2 차원 단면으로 투영하여 식 (7)을 식 (9)로 대체하여 계산한다.

$$F_{indirect} = -S_c \int \frac{F_{direct} \times f_{2D}(\alpha) \times \cos(\beta)}{d} dl \quad (9)$$

여기서  $dl$  은 각 점에서 미소 길이를 의미한다.

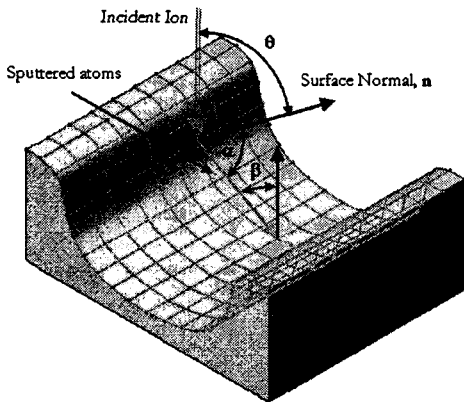
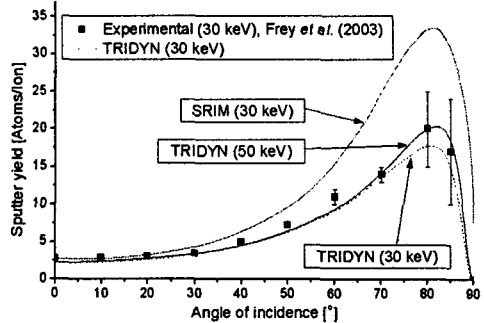


Fig. 4 Illustration of ion beam simulation model

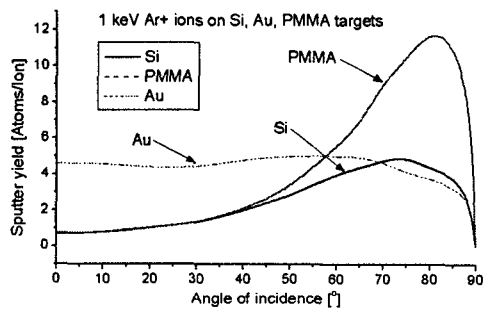
#### 4.2 스퍼터율과 스퍼터 원자 분포

스퍼터율은 Monte Carlo, Molecular Dynamic 등의 컴퓨터 시뮬레이션이나 실험 등을 통해서 구할 수 있으나 실험의 경우 입사각의 변화에 따라 구하기가 어려우므로 일반적으로 시뮬레이션 기법으로 구한다. 이번 연구에서는 Monte Carlo 기법으로 이온주입, 스퍼터율, 모재원자들의 자리이동(Recoil) 및 스퍼터 원자들과 후방산란 된 원자들의 에너지 및 공간분포 등을 계산할 수 있는 SRIM<sup>6</sup>, IMSIL<sup>7</sup> 및 TRIDYN<sup>8</sup> 을 가지고 입사각에 따른 스퍼터율과 방출각에 따라 스퍼터 된 원자들의 분포를 구하였다. Fig. 5 은 TRIDYN 과 SRIM 에서 구한 스퍼터율을 실험으로 구한 값과 비교한 것으로, 일반적으로 TRIDYN 은 모재 내에 이온주입 된 원자들로 인한

포텐셜(Potential)의 변화 까지도 고려하여 계산하므로 더 실험값에 접근하는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5 Comparison of various sputtering yields as a function of incident angle obtained from TRIDYN, SRIM and experiment (Experimental data are from Ref. 9)

스퍼터 된 원자들의 분포함수는 2D 및 3D 시뮬레이션에서 식 (10)와 같이 지수  $n$  을 가지는 코사인 함수로 나타낼 수 있으며, 인덱스  $n$  은 IMSIL 을 가지고 시뮬레이션으로 계산하였다.

$$f(\alpha) = \cos^n(\alpha) \quad (10)$$

### 5. 시뮬레이션 결과

#### 5.1 이온밀링

이온밀링의 경우 넓은 영역에 걸쳐 균일한 이온 밀도로 가공하므로 원하는 영역을 가공하기 위해서는 마스크 역할을 하는 층을 만들기 위해 일반적으로 포토레지스트를 도포 후에 광 노광 (Photolithography) 등의 과정을 거쳐 원하는 형상

에 맞게 포토레지스트(Photoresist)를 부분적으로 제거한 후에 이온밀링으로 가공을 시작한다. Fig. 5(b)에는 SRIM 으로 구한 1 keV 에너지 영역에서의 실리콘, 금(Au), 그리고 포토레지스트 재료인 PMMA 의 스퍼터율을 보여주고 있다.

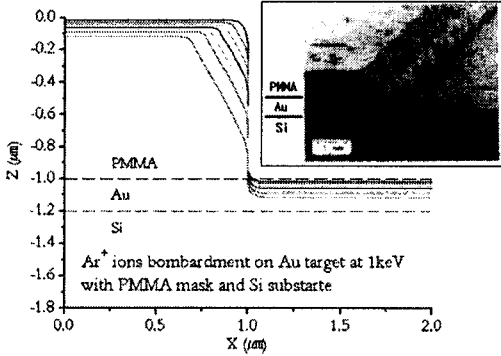


Fig. 6 SEM image of selective etching of Au deposited on top of silicon and simulation result

이번 연구에서는 실리콘 모재 위에 0.2 μm의 두께로 도포된 금 박막을 부분적으로 가공하기 위해 PMMA 를 1 μm두께로 도포 후 광 노광 공정을 이용하여 부분적으로 제거한 후 1 keV 에너지의 Ar<sup>+</sup> 이온으로 이온밀링 가공한 결과 <sup>10</sup>를 이용하여 시뮬레이션 하였으며, 가공 후의 결과와 시뮬레이션 결과가 Fig. 6에 보여지고 있다. 시뮬레이션은 두께가 재증착을 고려할 만큼 두껍지 않으므로 재증착은 고려하지 않았으며 현 방법으로 시뮬레이션 하였다. 초기에 PMMA 의 모서리는 직각이었으나 가공 후에 약 45°의 각도를 갖는 모서리를 형성하였으며 이는 입사 빔의 플렉스가 전체 입사면적에 대해 일정함에도 불구하고 스퍼터율이 이온의 입사각도에 따라 변하기 때문에 발생하는 이온빔 가공의 독특한 가공 특성이다.

## 5.2 집속이온빔

### 5.2.1.2 차원 시뮬레이션

집속이온빔을 이용하여 일정한 영역을 미소 가공 깊이로 여러 번 가공하는 것을 박스밀링(Box milling)이라 하며, 현 방법을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 30 keV의 Ga<sup>+</sup>을 Si 모재에 입사하여 가공하였으며, 최대전류는 7000 pA, 빔 직경(FWHM)은 110 nm 이고 가공 폭은 20 개의 빔을 50% 중첩하여

형성하였다. 재증착을 고려하기 위해 IMSIL 을 이용하여 계산한 스퍼터 된 원자들의 분포가 Fig. 7에 보여지고 있으며, Fig. 8(a)에는 집속이온빔으로 가공된 형상이 (b)에는 시뮬레이션 결과가 보여지고 있다.

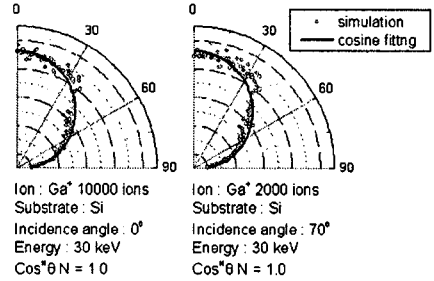
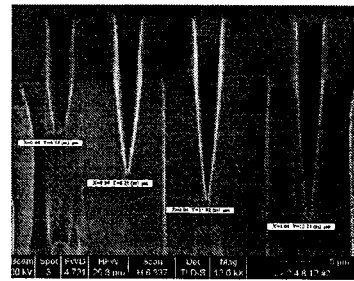


Fig. 7 Sputtered atoms distribution of Ga<sup>+</sup> incident on a silicon substrate at 30 keV under 0° and 70° of incident angles (Calculated by IMSIL)



(a)

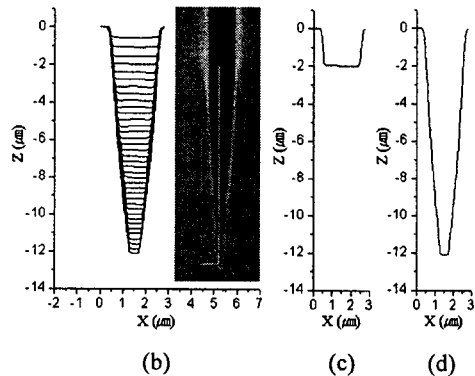


Fig. 8 SEM image of FIB box milled Si trenches (a) (FWHM: 100 nm, current: 7000 pA, overlap: 50%). The result of full simulation (b), vertical wall at which aspect ratio is about 1(c) and final state(d)

스퍼터 된 원자들의 분포는 일반적으로 이온의 입사에너지가 충분히 크면(> 1 keV) 지수  $n=1$  에 가까운 코사인 분포를 보이며 입사각이 커지더라도 표면법선 방향으로 대칭인 분포를 보이는 반면 에너지가 작으면 (< 1 keV) 중심부분이 움푹 파인 하트형상(Heart shape)에 가까운 분포를 보인다. 또한 이때 입사각이 더 커지면 거울반사(Specular reflection)의 형태로 법선 방향에 대해 비대칭 분포를 보인다.<sup>11</sup> 따라서 이번 연구에서는 Fig. 7 의 결과와 같이 10-50 keV 영역에서 모든 입사각에 대해 지수  $n=1$  인 코사인 분포를 가지는 것으로 시뮬레이션을 수행하였다.

실험결과 가공 깊이는 12.21  $\mu\text{m}$  이고, 초기의 중형비가 1 을 넘지 않은 영역에서는 거의 수직으로 측면을 형성하였으며(Fig. 8(c)), 중형비가 1 을 넘으면 재증착 플럭스의 영향이 커지므로 측면의 기울기가 서서히 바뀌고 가공량이 줄어들어 전체적으로 V 형상으로 가공이 이루어졌다(Fig. 8(d)).

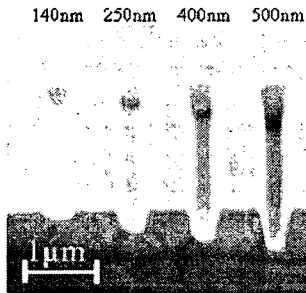


Fig. 9 SEM image of Si substrate box milled by FIB with  $\text{Ga}^+$  ions, 50 keV voltage and ion dose from 0.5 to 2  $\text{nC}/\mu\text{m}^2$  in step of 0.5  $\text{nC}/\mu\text{m}^2$ . The opening width of trench is 300 nm and values above the image were depths measured from the bottom of each trench

또한 50 keV 집속이온빔을 이용하여 폭 300 nm 의 트렌치(Trench)를 형성할 경우에도 Fig. 9 에서 보여지는 것과 같이 이온 도즈(Dose)가 증가할수록 점점 폭이 좁아지는 것을 알 수 있다. 수직 입사하는 50 keV 이온빔의 스퍼터율은 2.259 로 30 keV 의 스퍼터율 2.18 보다 약간 크게 계산되었다. 실험은 0.5  $\text{nC}/\mu\text{m}^2$  에서 2  $\text{nC}/\mu\text{m}^2$  까지 0.5  $\text{nC}/\mu\text{m}^2$  씩 도즈를 증가시켜 가공하였으며, 각 트렌치의 가공 깊이는 각각 140 nm, 250 nm, 400 nm 그리고 500 nm 였다.

시뮬레이션은 Fig. 10 에서 보여지는 것과 같이 레벨셋 방법을 사용하였으며, 초기 레벨셋 및 도즈량에 따른 레벨셋 표면의 변화를 제로레벨 곡선과 함께 보여주고 있으므로 레벨셋 방법 및 레벨셋 표면의 시간에 따른 변화를 이해하는데 도움이 되리라 생각한다.

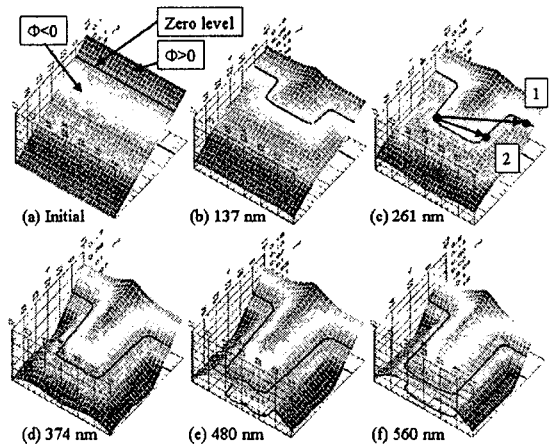


Fig. 10 Simulation results of Fig. 9. They show the results of the initial state of level surface(a), 0.5  $\text{nC}/\mu\text{m}^2$ (b), 1  $\text{nC}/\mu\text{m}^2$ (c), 1.5  $\text{nC}/\mu\text{m}^2$ (d) 2  $\text{nC}/\mu\text{m}^2$ (e) of ion doses and without redeposition flux(f)

시뮬레이션 결과 재증착을 고려한 경우 도즈의 증가량에 따라 가공 폭이 좁아졌으며, 가공 깊이는 각각 137 nm, 216 nm, 374 nm 그리고 480 nm 였으며 이는 재증착을 고려하지 않았을 경우 선형적으로 증가하는 140 nm, 280 nm, 420 nm 그리고 560 nm 의 결과와 비교하여 재증착의 영향으로 가공 깊이가 비선형적으로 감소했음을 알 수 있다.

또한 재증착을 고려하지 않았을 경우 Fig. 8 및 Fig. 10 의 시뮬레이션 결과에서 측면은 재증착 플럭스의 영향이 없으므로 모두 수직으로 가공되어야 한다. 재증착 플럭스를 고려하지 않았을 경우의 결과가 Fig. 10(f) 에서 보여지고 있는데 수직으로 가공이 되어 시뮬레이션이 정확하게 수행되었음을 알 수 있으며, 나아가 Fig. 10 의 (a)-(e) 의 시뮬레이션 결과가 재증착 플럭스를 정확히 고려했음을 알 수 있다.

### 5.2.2.3 차원 시뮬레이션

집속이온빔을 이용한 가공에서 일정영역을 여러 번 가공하는 대신 한번에 가공하게 되면 이온도즈(Dose)가 같더라도 상당히 다른 결과가 나오게 되는데, 폭이 점점 좁아지며 가공되는 트랜치가 형성되는 것이 아니라 Fig. 11 에서 보여지는 것과 같이 가공 방향으로 깊게 홈이 생성되고 비대칭적 형상으로 발전한다. 이때 좌측의 벽은 빔이 우측으로 진행하면 스캔을 하기 때문에 우측 벽에서 발생하는 재증착 플럭스들의 영향으로 인하여 다양한 기울기와 형상으로 변화된다. 이렇게 단면형상이 깊이 방향으로 일정하지 않은 형상은 2 차원으로 시뮬레이션 할 수 없으므로 3 차원으로 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과가 가공형상 및 최대 가공 깊이를 정확히 예측하고 있음을 Fig. 11 (b) 와 (c)를 통해 알 수 있다.

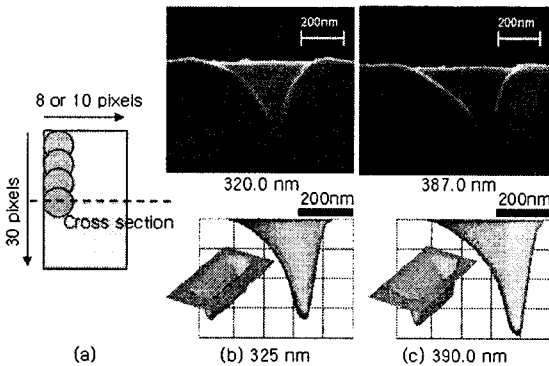


Fig. 11 Illustration of scanning condition and SEM images with simulation result. The dwell time and pixel spacing are fixed to 0.011(s) and 60 % overlap. Two boxes of 30×8 pixels(b) and 30×10 pixels(c) were milled bombarded with Ga<sup>+</sup> ion beam accelerated at 50 keV

## 6. 결론

이온빔을 이용한 마이크로/나노 가공프로세스를 재증착 플럭스를 포함하여 모델링 하였고 이를 검증하기 위해 현 방법 및 레벨셋 방법으로 2 차원 및 3 차원 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위해 이온과 고체의 상호용을 SRIM, IMSIL 및 TRIDYN 등의 Monte Carlo 기법으로 제작된 프로그램을 이용하여 스퍼터율과 방출각에 따른 재증착 플럭스 분포를 정량적으로 구하였고, 이를 이용하

여 플라즈마 이온밀링 프로세스와 집속이온빔 가공 프로세스를 분석하였다. 모델링을 적용한 시뮬레이션 결과는 실험결과를 정확히 예측하였으며, 추후 표면에서 반사되는 이온에 의한 2 차 스퍼터링과 2 차 재증착 효과까지도 고려한 정밀한 모델을 개발해야 할 것이다.

나노 패터닝은 나노기술의 핵심이며, 이온빔을 이용한 마이크로/나노패터닝은 MEMS/NEMS 분야에서 그 활용 범위를 넓혀가고 있으므로 이를 이용하여 마이크로/나노가공 프로세스를 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. Ivor, I. and Julius, J. M., "The Physics of Micro / Nano-Fabrication," Plenum Press, 1992.
2. Kaesmaier, R. and Loschner, H., "Ion Projection Lithography: Progress of European MEDEA & International Program," Microelectron. Eng., Vol. 53, No. 1, pp. 37-45, 2000.
3. Tseng, A. A., "Recent Developments in Micromilling using Focused Ion Beam Technology," J. Micromech. Microeng., Vol. 14, Issue 4, pp. R15-R34, 2004.
4. Sethian, J. A., "Level Set Methods and Fast Marching Method," Cambridge University, 1999.
5. Richard, F. D., Boolmfield, M. O., Sen, S. and Cale, T. S., "Extension Velocities for Level Set Based Surface Profile Evolution," J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 19, Issue 4, pp. 1630-1635, 2001.
6. Ziegler, F., "SRIM User Manual," IBM, USA, 2002.
7. Hobler, G., "IMSIL Manual," IAEA Vienna, Austria, 2003.
8. Moeller, W. and Posselt, M., "TRYDYN\_FZR User Manual," FZR Rosendorf, Germany, 2002.
9. 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.
10. Rangelow, I. W., "Computer Simulation of Line Edge Profiles under Going Ion Bombardment," J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 1, Issue 2, pp. 410-414, 1983.
11. Plummer, J. D., Deal, M. D. and Griffin, P. B., "Silicon VLSI Technology," Prentice Hall, 2000.