

◆특집◆ 에너지빔 이용 정밀가공 기술

마이크로-나노 가공을 위한 집속이온빔 공정 시뮬레이션

이희원*, 한진*, 민병권*, 이상조*

Simulation of Focused Ion Beam Processes for Micro-Nano Machining

Hiwon Lee*, Jin Han*, Byung-Kwon Min* and Sang Jo Lee*

Key Words : Focused Ion Beam processing (집속이온빔 가공), Geometrical accuracy (형상정밀도), Simulation Method (시뮬레이션 방법)

1. 서론

최근 여러 가지 산업분야에서 미세 부품의 수요가 급속도로 증가하고 있으며 또 그 부품에 필요로 하는 정밀도 역시 중요한 문제로 대두되고 있다. 따라서 정밀부품의 가공을 위한 마이크로-나노 영역의 3 차원 가공이나 표면의 패터닝이 가능한 여러 방법이 제안되고 연구되고 있다. 그 중에 집속이온빔(Focused Ion Beam, FIB)를 응용한 가공법은 그 응용범위와 가공성능이 우수하여 많은 연구자들의 관심을 받고 있는 가공법 중의 하나이다.

집속이온빔장치는 금속 이온을 가속하여 방출한 후에 집속시켜서 시료에 충돌하는 방법을 통하여 시료의 미세형상이나 절단면을 확인하는 장치로 사용된다. 최근에 미세가공의 영역에서 그 응용이 확대되고 있다. 집속이온빔장치를 사용하여 미세가공을 수행하는 방법은 크게 에칭과 증착의 두 가지 방법이 있다. 에칭 공정은 가속된 이온에 의한 스퍼터링 현상으로 시료를 제거하는 방법이고, 증착 공정은 가속된 이온의 에너지를 전달받은 증착 가스에 의한 CVD(화학 기상 증착법)을 통하여 이루어진다. 집속이온빔 장치는 이온광학계를 통하

여 이온빔은 5nm 정도의 빔 크기로 집속시킬 수 있고 이를 빔 스캔방법을 통해서 시편에 조사하는 것이 가능하다. 이를 통하여 가공을 수 나노의 영역에서 수행하는 것이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

그러나 이러한 가공방법은 세기가 특정 형태의 분포를 갖는 이온빔을 사용하기 때문에 발생하는 여러 가지 오차를 갖고 있다. 따라서, 가공의 정밀도를 향상시키기 위하여 여러 가지 연구가 진행되고 있다. 그 중 대표적인 것이 시뮬레이션을 통한 형상오차의 예측을 통하여 정밀도를 향상시키려는 노력이며, 이를 위해서는 이온빔 가공을 시뮬레이션할 수 있는 기술이 필요하다.

이온빔 가공을 시뮬레이션 하기 위해서는 우선 이온의 입자와 표면의 입자간의 상호작용을 해석하여 그 상호거동을 확인하는 것이 우선되어야 한다. 또 재부착 현상으로 가공의 형상정밀도가 낮아져서 원하는 형상을 얻기 어려운 문제점이 있다. 따라서 이를 시뮬레이션을 통하여 최종형상과 가공 현상을 예측하는 것이 중요하다. 이를 통하여 가공의 정밀도를 높이고 복잡한 3D 형상의 가공을 가능하게 하여 FIB 장치의 활용도를 높이는 결과를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 집속이온빔의 가공 정밀도 향상을 위한 시뮬레이션에 관한 연구의 동향과 그 결과들에 대하여 설명하고자 한다.

* 연세대학교 기계공학부

Tel. (02) 2123-5813

E-mail bkmin@yonsei.ac.kr

2. 이온빔 시뮬레이션 연구동향

이온과 표면의 상호작용을 해석하고 시뮬레이션 하는 방법은 크게 두 가지 흐름으로 나뉠 수 있는데 Molecular Dynamics (MD)를 사용하거나 Monte Carlo 방법을 사용하는 두 가지가 있다. 두 가지 방법은 상호보완적으로 사용될 수 있으며 지금까지의 연구를 통하여 높은 에너지의 이온빔에서는 몬테카를로 방법을 사용하는 것이 더 효과적이며 낮은 에너지의 이온빔에서는 MD 방법을 사용하는 것이 실제의 현상을 더 잘 묘사하는 것으로 알려져 있다. 몬테카를로 방법에서는 이온빔과 표면의 원자와의 충돌을 주로 BCA (Binary Collision Approximation) 모델로 표현하여 시뮬레이션하고 있다.

이러한 시뮬레이션 코드는 1981 년에 Sigmund¹의 Linear Collision Cascade 이론을 기반으로 작성되어 계속적으로 업데이트가 되고 있으며, 공개되어 있는 코드인 TRIM, SRIM, TRYDIN 등을 통하여 가속된 이온 입자들이 공작물 표면으로 침투하여 얼마만큼의 에너지를 가지고 이동하는지 그 이동방향과 이동거리에 관한 정보를 얻을 수 있고, 얼마만큼의 에너지를 가지고 스퀘터링(scattering)되는지, 어떤 영역, 어떤 깊이에서 임플란테이션(implantation)되는지에 관한 정보를 얻을 수 있다. 또한, 공작물의 표면에서 얼마만큼의 입자가 스퍼터링(sputtering)되는지, 또 얼마만큼의 에너지를 표면에 전달하는지에 관한 데이터를 얻을 수 있다. Fig. 1 은 TRIM 시뮬레이션을 사용하여 소재에 조사된 이온빔이 어떻게 재료내부에서 움직이는지를 보여주고 있는 그림이다.

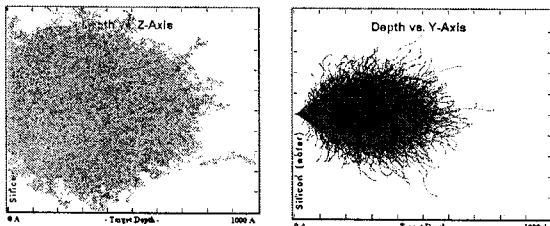


Fig. 1 TRIM simulation of ion-solid interaction

이상의 데이터를 이용하여 Hobler² 등은 2001년에 발표한 논문에서 이온빔 밀링공정으로 깊은 트렌치 구조를 가공하는 내용을 몬테카를로 방법

으로 시뮬레이션하여 발표하였다. 또 1995 년 Katardjiev³ 등은 에칭과 증착의 현상을 기반으로 가공표면의 변화를 시뮬레이션을 통하여 확인하는 연구를 수행하고 있다. Vasile⁴ 등은 1999년에 발표된 논문은 통하여 원하는 형상의 가공을 위하여 각 위치에서의 시뮬레이션을 통한 주사시간을 조절하는 방법을 통하여 형상 가공을 수행하였고, Adams⁵ 등은 2006 년의 연구에서는 반구 형상의 2차원 시뮬레이션을 통하여 3 차원 가공을 위한 연구를 수행하고 있다. Kim⁶ 등은 이온빔공정의 모델링을 정리하여 레벨셋 표면진화방법을 사용하여 공정결과를 시뮬레이션하여 가공형상 및 가공깊이를 정확하게 예측하였다.

이온빔 가공에 관한 시뮬레이션은 주어진 이온빔과 공작물의 파라미터를 통하여 해석되는 데이터를 응용한다.

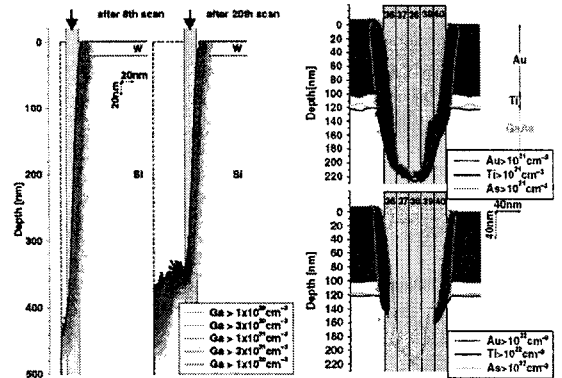


Fig. 2 Simulation of trench structure by Hobler²

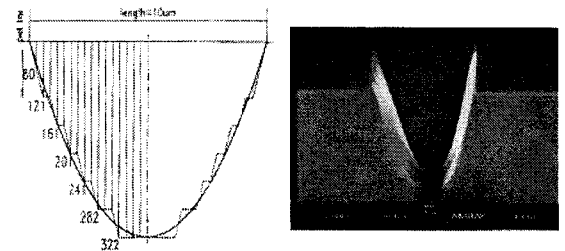


Fig. 3 Machining 3D surface using control dwell time with simulation data by Vasile⁴

스퍼터링 현상을 이용한 이온빔 밀링공정은 기본적인 이온빔 가공공정으로 많이 사용되고 있고 그 가공 결과를 시뮬레이션 하기 위한 연구도 진

행되고 있다. 가속된 이온 입자와 가공물의 표면의 입자들과의 충돌에 관한 시뮬레이션 코드에서 계산되는 스퍼터링 일드(yield)를 통하여 일정량의 이온빔에 의하여 제거되는 공작물의 양과 그 형태를 정의하고 반복적인 이온빔의 스캐닝에 의하여 가공물의 표면이 가공되어 가는 것을 시뮬레이션 하여 최종 가공형상을 예측하는 시뮬레이션 방법이 개발되고 있다. 하지만 스퍼터링 현상이 이온빔의 조사되는 각도에 의하여 다른 값을 갖게 되므로 계속적인 표면의 변화에 따라서 가공량이 변화하게 되는 문제점이 발생한다. 또 더 심각한 문제로 스퍼터링된 입자들이 가공물에 다시 붙는 재부착 현상이 발생하여 가공의 세장비를 높이는데 어려움이 있고 가공정밀도를 떨어트리는 문제가 발생한다. 따라서 스퍼터링 공정 중에 입자들의 움직임을 모델링하는 연구가 필요하다.

현재 이온빔 밀링공정의 시뮬레이션에 대한 연구는 주로 트랜치구조나 2 차원적인 단순 형태의 가공결과를 예측하는데 그치고 있으나, 점차적으로 3 차원 미세구조의 가공으로 영역이 확대되어 가고 있다. 이러한 3 차원 가공을 해석하기 위해서 효과적인 표면진화 알고리즘을 적용하기 위한 연구도 진행되고 있다. 또, 시뮬레이션을 실제 가공에 적용하기 위하여 여러 가지 가공 파라미터의 다른 가공 성능 및 가공 결과의 영향을 알아보고 시뮬레이션을 통하여 확인하는 연구도 진행이 되고 있다. 반도체 공정에서 많이 사용되는 에칭, 증착 공정의 시뮬레이션 방법을 이온빔 가공에 적용하여 가공현상을 예측하고 응용하는 방향의 연구도 진행되고 있으며 이온빔의 발생과 진행을 시뮬레이션 하는 내용의 연구도 진행되고 있다. 또 이온빔의 주요 기능중의 하나인 증착공정에 관하여 시뮬레이션하려는 연구도 시도되고 있다.

3. 스퍼터링 현상 시뮬레이션

이온빔 가공을 시뮬레이션 하기 위해서는 우선 이온빔의 조사에 의한 소재와의 충돌에서 발생하는 현상들을 시뮬레이션 해야 한다. 그 중 가장 대표적으로 발생하는 현상은 스퍼터링 현상으로 에너지를 가진 입자의 충돌로 인하여 표면을 구성하는 입자가 떨어져나가는 현상이다. 입사되는 이온의 모멘텀이 표면으로 전사되어 새로운 표면형상을 생성하기 때문에 이를 응용하여 가공을 수행하

는 것이 가능하다.

이온빔 가공의 재료제거율은 조사되는 이온빔의 에너지에 비례하나 조사되는 표면의 형상에 의하여 그 에너지의 전달양상이 달라지게 되면서 큰 영향을 받게 된다. 스퍼터링 현상에 의하여 발현되는 형상에 영향을 미치는 요인은 크게 세가지가 있다. 이온빔의 에너지밀도가 가우시안 분포를 따른다는 점과 입사되는 이온빔의 각도에 따라 나타나는 영양, 그리고 스퍼터링에 의하여 떨어져나간 입자들이 주변의 형상에 따라 재부착되는 형상을 모두 고려해야만 스퍼터링 현상에 의한 결과를 실재에 가깝게 시뮬레이션 할 수 있다. 또 스퍼터링 현상은 이온빔이 조사되는 표면형상에 영향을 받고 또 계속적으로 표면형상이 변화하기 때문에 연속적으로 시뮬레이션이 이루어져야 현상에 최대한 가깝게 시뮬레이션 할 수 있다.

스퍼터링의 결과 형상은 조건에 따른 스퍼터링 일드에 따라 결정된다고 정의할 수 있으며 그 스퍼터링 일드 $Y(E)$ 는 Sigmund 의 모델에 따라서 조사된 이온에 의해서 스퍼터링되는 원자의 숫자로 정의한다.¹

$$Y(E) = P \frac{S_n(E)}{1 + 0.35U_0 S_i(E)} \left[1 - \left(\frac{E_{th}}{E} \right)^{1/2} \right]^{28} \quad (1)$$

U_0 는 표면결합 에너지이며 $S(E)$ 는 충돌정지 영역단면, E_{th} 는 스퍼터링 임계에너지이며, P 는 스퍼터링 일드의 상수이다.

하지만 이온조사에 의한 스퍼터링은 소재 내부의 입자들의 연쇄충돌 반응에 의하여 이루어지게 되므로 스퍼터링 일드는 이온빔의 입사각도에 의하여 다른 값을 갖게 된다. 따라서 스퍼터링 일드는 수직으로 입사되는 스퍼터링 일드에 입사각에 의한 변화를 적용하여 사용하게 된다. Yamamura⁷ 등에 의하여 제시된 식 (2)와 같은 형태의 이론적 모델을 사용하여 전체적인 입사각의 영역에서 실제의 현상을 잘 묘사하고 있다.⁶

$$Y(E, \theta) = Y(E) \cos \theta^{-f} e^{-c \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \cos \theta_{op}} \quad (2)$$

식 (2)에서 $Y(E)$ 는 식(1)을 통해서 얻을 수 있는 수직으로 입사했을 때의 결과이며 c 와 f 는 이온과 스퍼터링이 일어나는 소재의 조합에 의하여

정해지는 상수이다. θ_{opt} 은 최대의 수율을 갖는 최적의 각도로 정해진다.

집속이온빔 장치에서 집속되어 조사되는 이온빔은 가우시안 분포를 가지며 이 형태가 가공형상에 영향을 미치게 된다. 가우시안 분포를 3 차원 시뮬레이션에서 사용하기 위한 빔의 분포식은 다음과 같다.

$$f_{x,y}(x_i, y_j) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right)^2 e^{-\frac{[(x_i-x)^2 + (y_j-y)^2]}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

가우시안 분포의 이외에도 3 차원 형상을 집속 이온빔 밀링가공의 결과 및 스퍼터링 현상에 영향을 미치는 여러가지 요인들이 있다. 그 중에서도 가공형상의 변화에 좋지 않은 영향을 미치는 재부착현상은 스퍼터링되어 튀어나온 입자들이 그 주변의 형태에 의하여 미쳐 제거되지 못하고 재부착되는 현상이다. 이렇게 재부착된 입자들은 가공의 형상정밀도를 떨어트리는 역할을 하고, 세장비를 높이는 데에 있어서 걸림돌이 된다.

재부착현상을 시뮬레이션하기 위해서는 스퍼터링되어서 비산되는 분포를 먼저 고려해야 한다. 또 주변의 표면 형상을 고려하여 재부착되는 지점까지의 거리와 각도를 구하고 이를 기반으로 각 지점에서의 재부착되는 양을 시뮬레이션 하게 된다. 재부착되는 양에 관한 연구는 Orloff⁸ 에 의해서 수행되었는데 스퍼터링된 입자들이 코사인분포를 따라서 비산되고 재부착되는 것으로 근사하였다.

여기에 스퍼터링이 일어나는 영역과 재부착이 일어나는 영역과의 관계를 가시도를 고려하여 정의하고 시뮬레이션하는 방법을 제안하였다. 스퍼터링되어 날라가는 입자가 직선으로 날라간다고 하면 두 영역간의 가시도가 확보될 때에만 재부착이 발생가능하기 때문이다. 따라서 재부착현상에 관한 내용을 정리하면 식(4)와 같다.

A-B is visible:

$$r(x, y) = K \cdot Y^*(\theta, E) \iint \frac{\cos\phi \cos\theta}{r} dx dy \quad (4)$$

A-B is invisible:

$$r(x, y) = 0$$

K 는 부착이 일어나는 비율을 정의하는 계수이고 Y^* 는 스퍼터링 현상에 의하여 표면 밖으로 뿜

겨 나온 입자의 양을 나타낸다.

이온빔에 의한 스퍼터링 현상에 영향을 미치는 세가지 요인을 정리하면 조사되는 이온빔은 그 자체로 가우시안의 분포를 갖고 있고 표면과 조사되는 이온빔의 각도에 의하여 그 영향이 달라지며 일단 스퍼터링에 의하여 튀어나온 입자들이 완전히 제거되지 못하고 주변의 형상에 의하여 재부착되는 현상이 발생하게 된다.

이러한 현상은 연속적인 빔의 조사가 이루어지는 상황에서 벌어지며 각각의 영향이 바로 직전의 표면 형상을 반영하여 적용된다. 따라서 이를 시뮬레이션하기 위해서는 수학적인 모델링을 통하여 연속적으로 벌어지는 사건을 계산하여야 한다. 그러나 각각의 영향들은 계속적으로 변하는 표면형상을 기반으로 하여 그 결과가 변하기 때문에 세 영향들이 독립적으로 어떤 결과를 내는지를 분리하여 표현하는 것은 어려운 문제가 있다. 따라서 시뮬레이션에서는 실제 시간의 흐름에 맞추어 순차적으로 표면형상을 업데이트하면서 각각의 영향을 계산하여 적용하는 방식을 따른다.

전체의 스퍼터링으로 생성되는 가공표면과 전체 가공량을 나타내는 $S(x, y)$ 를 표현하는 식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$S(x, y) = \sum_{i=1}^{N_s} \left(\iint [f_{x,y}(x, y) \cdot Y(E, \theta) \cdot t_{xy} + r(x, y)] dx dy \right) \quad (5)$$

Fig. 4 는 시뮬레이션에 의하여 계산된 단일 스팟 빔의 결과와 각각의 영향을 가상적으로 구현한 결과이다. 단일 가우시안의 영향의 결과와 각도의 변화에 따른 스퍼터링 일드의 변화와 재부착현상까지 고려한 내용으로 결과를 확인할 수 있다.

스퍼터링 현상에 의하여 구현되는 표면의 계산은 집속이온빔 장치에서의 빔 스캔 방법에 따라 중첩되어서 3 차원 가공을 위한 밀링공정으로 적용되게 된다. 따라서 이를 바탕으로 3 차원 공정을 해석할 수 있다.

4. 집속이온빔 밀링공정 시뮬레이션

집속이온빔을 이용한 밀링공정은 이온빔의 조사되는 위치와 방법을 조절하여 마치 기계가공에서의 밀링머신과 유사한 가공이 이루어진다. 이를

위한 파라미터에는 빔 전류, 빔 직경, 빔 조사시간, 빔 스캔방법, 중첩도 등이 있으며 이를 조절하여 원하는 형상을 가공하게 된다. 이러한 밀링공정을 시뮬레이션하기 위해서는 실제의 시스템에서의 빔의 움직임을 정확하게 모사하여 동일한 방법으로 계산이 이루어지게 하는 것이 중요하다.

Fig. 5 는 30kV 의 Ga^+ 을 실리콘 웨이퍼의 표면에 조사하여 2 μm 포켓형상을 가공한 결과와 그 시뮬레이션을 비교한 그림이다. 실제의 가공현상과 시뮬레이션의 결과가 비교적 일치하고 있으며 포켓의 모서리 부분이 재부착현상과 가우시안분포에 의해서 형상오차가 발생하고 있는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6 는 동일한 환경에서 계단형상을 가공한 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 계단형상의 가공 깊이가 깊어질수록 재부착현상에 의한 영향이 커지기 때문에 전체적인 형상오차가 크게 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 7 은 밀링공정 중에 오버랩을 조정하여 마이크로 패턴을 가공한 결과이다. 스퍼터링 현상을 간격을 주어 생성함으로써 하여 가공 표면에 패턴형상을 줄 수 있는 것을 확인하였다.

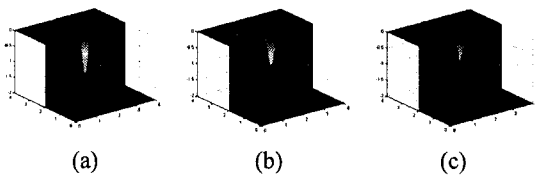


Fig. 4 Simulation result of sputtering phenomenon at single spot: (a) only Gaussian effect (b) with incident angle distribution effect (c) with redeposition effect

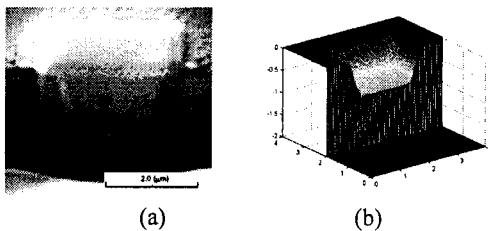


Fig. 5 Result of milling process 2um pocket shape: (a) FIB cross section image of machined pocket (b) simulation data of machined surface

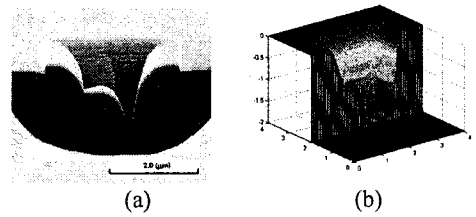


Fig. 6 Result of milling process step shape: (a) FIB image of machined pocket (b) simulation data of machined surface

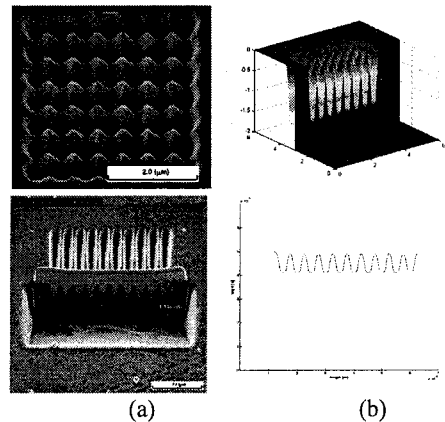


Fig. 7 Result of milling process pattern: (a) FIB image of machined pattern (b) simulation data of machined surface

5. 집속이온빔 증착공정 시뮬레이션

집속이온빔을 이용한 증착공정은 가스상태로 재료 표면에 증착하고자 하는 물질을 흡착시키고 이를 이온빔으로 조사하여 에너지를 전달하고 증착시키는 방법으로 3 차원 미세구조물의 제작이 용이하여 많은 연구가 진행되고 있는 분야이다.

증착공정을 시뮬레이션하기 위해서는 진공챔버 내부에 작용하는 압력과 증착가스가 표면에 흡착되는 정도에 관한 정보를 알고 있어야 한다. 또 이온빔의 조사에 의하여 얼마만큼의 증착가스가 제거되고 새로운 증착물로 변하는지에 관한 해석이 필요하다. 증착공정은 이온빔에 의한 스퍼터링 현상과 증착가스에 의한 증착현상이 동시에 일어나므로 그 각각의 영향을 해석하는 것이 중요하다.

증착공정에서는 빔 조사 시간이 중요한 요소로 작용하는데, 빔 조사 시간이 길면 스퍼터링 현

상이 우위로 작용하여 오히려 표면이 깎이는 결과를 얻게 된다. 또 빔 조사방법에 따라서 동일한 지점에 이온빔 조사가 이루어진 후에 다시 그 지점에 조사되기까지의 시간 동안 증착가스의 재흡착이 얼마만큼 이루어지는지에 관한 해석이 필요하다. Fig. 8 은 간단한 기둥의 증착을 시뮬레이션한 결과와 실제의 실험결과를 비교한 사진이다. 4 μm 높이의 탄소를 증착한 결과이며 거의 정확하게 높이를 예측하고 있다.

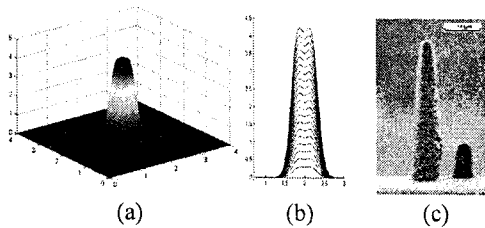


Fig. 8 Result of deposition process: (a) simulation data of deposition feature (b) simulation data of accumulate the deposit layer (c) FIB image of deposition

6. 결론

마이크로-나노 영역에서의 형상정밀도를 구현하기 위한 집속이온빔을 이용한 가공에서의 시뮬레이션에 관한 연구를 수행하였다. 집속이온빔 가공을 위한 시뮬레이션 방법은 우선 스퍼터링 현상을 계산하여 이를 빔 스캔 방법에 따라 중첩하여 결과를 도출하는 방법을 따른다. 스퍼터링 현상에 크게 영향을 미치는 요소는 세가지로 빔의 가우시안 분포, 조사되는 각도에 따른 스퍼터링 일드의 변화와 재부착현상을 생각할 수 있다.

시뮬레이션 방법을 적용하여 밀링공정에서의 가공깊이와 표면형상등과 재부착효과에 따른 형상오차와 같은 내용을 파악할 수 있었다. 증착공정의 경우에도 가공결과를 정확하게 예측할 수 있었다. 이렇게 예측된 결과를 통하여 가공 파라미터의 조절이나 보정 가공등의 방법을 통하여 전체적인 가공의 형상정밀도 향상을 기대할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 차세대신기술개발사업

“고효율 에너지빔 응용 초미세 부품 제조용 In-line 시스템 개발”의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Sigmund, P., “Mechanisms and Theory of Physical Sputtering by Particle Impact,” Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 27, Issue 1-2, pp. 1-20, 1987.
2. Boxleitner, W. and Hobler, G., “FIBSIM - dynamic Monte Carlo simulation of compositional and topography changes caused by focused ion beam milling,” Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B-Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 180, Issue 1-4, pp. 125-129, 2001.
3. Katardjiev, I. V., Carter, G., Nobes, M. J., Berg, S. and Blom, H. O., “3-Dimensional Simulation of Surface Evolution During Growth and Erosion,” Journal of Vacuum Science & Technology a-Vacuum Surfaces and Films, Vol. 12, issue 1, pp. 61-68, 1994.
4. Vasile, M. J., Niu, Z., Nassar, R., Zhang, W. and Liu, S., “Focused ion beam milling: Depth control for three-dimensional micro-fabrication,” 41st International conference on electron, ion, and photon beam technology and nanofabrication, Dana Point, pp. 2350-2354, 1997.
5. Adams, D. P. and Vasile, M. J., “Accurate focused ion beam sculpting of silicon using a variable pixel dwell time approach,” Journal of Vacuum Science & Technology B, Vol. 24, Issue 2, pp. 836-844, 2006.
6. Kim, H. B. and Hobler, G., “Ion Beam Induced Micro/Nano Fabrication: Modeling,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No.8, pp108-115, 2007.
7. Yamamura, Y., Takiguchi, T. and Ishida, M., “Energy and Angular-Distributions of Sputtered Atoms at Normal Incidence,” Radiation Effects and Defects in Solids, Vol. 118, Issue 3, pp. 237-261, 1991.
8. Orloff, J., “Handbook of charged particle optics,” CRC press, pp. 440-442, 1997.