

집속이온빔을 이용한 실리콘 나노 패터닝: 시뮬레이션과 가공 한진*, 민병권, 이상조 (연세대학교 기계공학부)

Silicon Nano Patterning Using Focused Ion Beam: Simulation and Fabrication

J. Han*, B.-K. Min, S. J. Lee (School of Mechanical Engineering, Yonsei University)

ABSTRACT

To establish fabrication techniques for nano structure understanding of focused ion beam (FIB) milling process is required. In this study the mathematical model containing the factors related to FIB milling is developed to acquire the optimal fabrication condition. Then, the model is verified by comparison with various nano pattern fabricated in actual FIB system. Consequently, it is demonstrated that the nano patterns with the smallest pitch can be fabricated using developed FIB milling model.

Key Words: FIB Milling (집속이온빔 밀링), Nano Pattern (나노 패턴), Simulation (시뮬레이션)

1. 서론

최근 집속이온빔 장치를 이용한 초미세 구조물의 성형에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 집속이온빔 장치의 재료 제거 공정은 이온 빔의 강도가 가우시안 분포를 가지는 점을 이용하여 가우시안 빔의 중첩을 통해 이뤄지는 것으로 이해할 수 있다. 따라서, 이론적으로는 빔 간격이 빔 사이즈(FWHM)의 0.9 배 이하인 경우 일정 피치를 가지는 패턴이 성형되어야 한다¹. 그러나 모재(substrate) 입자의 스퍼터링(sputtering)으로 인해 재료 제거 메커니즘이 보다 복잡해져서 실제로는 패턴 성형이 되지 않음을 확인 할 수 있다.

본 연구에서는 가우시안 빔 중첩을 포함한 입자의 스퍼터링 등 다양한 효과를 고려하여 FIB 밀링 모델을 구성하고 실리콘 재료에 대한 나노 패터닝 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 집속이온빔 밀링 모델

이온빔의 강도가 가우시안 분포를 가진다고 가정할 때² 가우시안 빔 분포의 중첩, 입사각에 따른 스퍼터링 수율의 변화, 재증착 효과 등의 영향들을 모두 고려한 FIB 밀링 모델을 얻을 수 있다.

가우시안 빔의 중첩은 드웰 시간(dwell time), 가공 면적, 이온 조사량에 따라 빔 조사의 반복과정으로 이루어 지는데 이런 스캔 프레임 반복 수(iteration)를 가우시안 중첩 모델에 적용해야 한다. 스캔 프레임 반복 수는 총 이온 조사량에서 한 프레임당 조사되는 이온 조사량을 나눔으로써 구할 수 있다. 그러므로 스캔 프레임 수를 고려한 가우시안 분포 중첩 식은 다음과 같다.

$$D = \sum_{i=1}^{iteration} \sum_{n=1}^N \frac{D_{s,f}}{\eta} \exp\left\{-\left[\frac{2.235(x-np)}{d\sqrt{2}}\right]^2\right\} \quad (1)$$

η 는 원자 밀도(atomic density), iteration은 스캔 프레임 반복 수, d 는 빔 직경, p 는 빔 조사 간격, $D_{s,f}$ 는 한 프레임당 이온 더즈(dose)이다.

스퍼터링 현상은 원자나 분자들의 충돌에 의해 지배되므로 스퍼터링 수율은 초기 입사각에 따라 달라진다. 스퍼터링 수율은 Sigmund 이론을 기본으로 하여 Ziegler가 수정한 식을 이용하였다³. Sigmund 이론 식에서 계산된 스퍼터링 수율(Y)을 토대로 초기 입사각에 대한 스퍼터링 수율 $S(\theta)$ 는 다음과 같이 구해진다⁴.

$$S(\theta) = Y \cos \theta^{-f} \exp[-c(\cos \theta^{-1} - 1) \cos \theta_{opt}] \quad (2)$$

c, f 는 이온 고체(solid) 결합에 의한 물리 상수이며 θ_{opt} 는 스퍼터링 수율의 최대값에 대한 각도이다.

재증착(redemption) 현상은 스퍼터링 이후의 제거된 입자들이 벽면이나 바닥에 붙는 현상으로 Orloff에 의해 다음과 같이 모델링 된다⁵.

$$F(h) = K \cdot F_0 \int_0^h \frac{\cos \phi \cos \Phi}{r} dx \quad (3)$$

K 는 흡착 계수(sticking coefficients)이며 F_0 는 싱글 픽셀 가공 시의 모재의 스퍼터링 된 원자 수이다. a 와 b 는 가공의 시작점과 끝점이다.

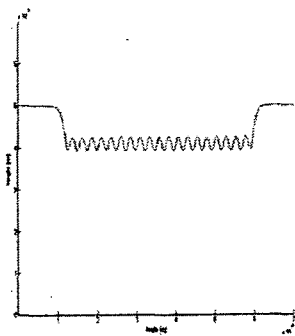
이상의 빔의 중첩, 스퍼터링, 재증착 등 모든 영향을 고려한 집속이온빔 밀링 모델은 다음과 같다.

$$f(x) = \sum_{i=1}^{iteration} \left\{ \sum_{n=1}^N \frac{D_{s,f}}{\eta} \exp\left\{-\left[\frac{2.235(x-np)}{d\sqrt{2}}\right]^2\right\} \cdot S(\theta) + K \cdot F_0 \int_0^x \frac{\cos \phi \cos \Phi}{r} dx \right\} \quad (4)$$

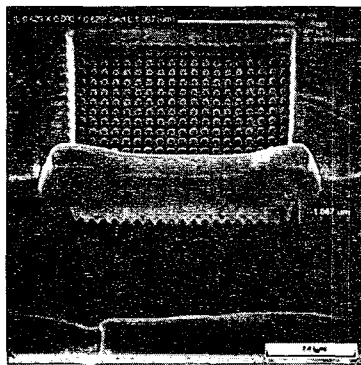
3. 결과

3.1 실험 조건

실험은 30 keV 가속 전압의 갈륨을 이온 소스로



(a) Simulation result



(b) Experiment result

Fig. 1 Comparison between the simulation and experiment results in silicon nano pattern fabrication

사용하였다. 나노 패턴을 성형하기 위해 빔 간격을 빔 직경보다 크게 하여 가공 밀면이 불균일한 형상이 나오게 하였다. 빔 직경은 빔 전류가 증가할수록 커지므로 최소 피치를 얻기 위해서 1 pA 의 13 nm 빔 직경을 사용하였다. 또한 다양한 빔 전류를 통해 패턴이 성형되는 최소 오버랩 조건을 얻었다.

3.2 시뮬레이션 알고리즘

시뮬레이션 알고리즘은 가속 전압과 조사 이온의 종류에 따른 물성치를 입력 받아 스퍼터링 수율과 입사 각도에 따른 스퍼터링 수율을 구하였다. 또한 집속이온빔 가공 조건인 빔 전류, 오버랩, 드웰 타임, 이온 더즈 등을 입력 받아 스캔 프레임 반복 수와 프레임당 조사되는 이온 더즈량을 얻었다. 이 값들을 통해 밀링 과정인 가우시안 빔 중첩, 입사 각에 따른 스퍼터링, 재증착 효과를 고려해서 일정 가공 형상이 나오게 되고 스캔 반복 수만큼 이러한 과정이 반복되어 최종 형상이 나오게 된다.

3.3 실험 결과와 시뮬레이션 결과

Figure 1 은 빔 전류가 191 pA (35 nm) 일 때 나노 패턴을 성형한 시뮬레이션 결과와 실험 결과이다. 단면 분석을 위해 1 μm 두께의 카본 층을 증착 한

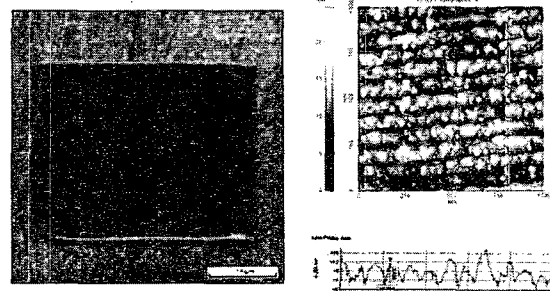


Fig. 2 Fabrication result of nano pattern

후 관찰하였다. 시뮬레이션 결과의 가공 깊이는 1.041 μm 이며 실험 결과는 1.067 μm 로 오차율은 2 %이다. Figure 2 는 실리콘에 가공 할 수 있는 최소 피치를 시뮬레이션을 통해 공정 변수를 파악한 후 실험한 50 nm 피치의 나노 패턴 이미지이다.

4. 결론

나노 패턴을 성형하는 최적 조건을 찾기 위하여 밀링 모델을 세운 후 시뮬레이션을 통해 실험 결과와 비교하였다. 밀링 모델은 가우시안 빔 중첩, 이온의 입사각도에 따른 스퍼터링 수율, 재증착 현상을 고려하여 구성하였다. 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 통해 빔 특성을 확인 할 수 있었으며 실리콘에 피치 50 nm 를 가지는 나노 패턴을 성형하였다. 가우시안 프로파일에 대한 정확한 예측과 수정으로 보다 정확한 모델링과 이를 통한 시뮬레이션 결과를 이끌어 낼 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 산업자원부가 지원하는 산업기술기반 조성사업 중 마이크로 나노 점 선 가공기반 구축 사업단의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. A. A. Tseng, "Recent developments in micromilling using focused ion beam technology," J. Micromech. Microeng. , Vol. 14, pp. 15-34, 2004.
2. L. R. Harriott, "Beam size measurements in focused ion beam systems," J. Vac. Sci. Technol., A 8, p 899, 1990.
3. M. Nastasi, Ion-solid interactions fundamentals and applications, Cambridge University Press, 2003.
4. Y. Yamamura, Y. Itakawa, and N. Itoh, "Angular Dependence of sputtering yields of monatomic solids," IPPJ-AM-26, Institute of Plasma Physics, Nagoya University, Nagoya, Japan, 1983.
5. J. Orloff, Handbook of charged particle optics, CRC press, 1997.