

집속이온빔 공정에서 스웰링에 영향을 주는 인자에 관한 연구 Parametric Study on Swelling Phenomenon of Focused Ion Beam Processes

*윤태기, 김태곤, #민병권, 이상조

*T. G. Yoon, T.-G. Kim, #B.-K. Min(bkmin@yonsei.ac.kr), S. J. Lee
연세대학교 기계공학부

Key words : ion implantation, ion irradiation, amorphization

1. 서론

집속이온빔(Focused Ion Beam, FIB) 장치는 액체금속이온으로부터 방출된 이온을 이온광학계를 이용하여 집속시켜서 마이크로 미터 이하의 영역을 가공하는 초정밀 가공 장비이다. 집속이온빔 공정에서 재료의 제거는 집속된 이온의 에너지에 의한 재료의 스퍼터링(sputtering)현상으로 일어나게 되며 스퍼터링 현상은 주입된 이온의 에너지에 의해 재료를 구성하는 원자 사이의 결합력이 끊어져서 제거되는 현상을 말한다. 주입된 이온의 에너지가 원자 사이의 결합력을 끊지 못하면 조사된 이온은 재료 내부에 주입되며 재료 내부의 격자구조를 변화시키게 된다. 재료 내부의 격자구조가 변할 때 표면이 부풀어 올라오는 현상이 발견되는데 이 현상을 스웰링이라고 한다.

스웰링 현상은 반도체 공정 중 하나인 이온주입(implantation)공정 후 표면에서 관찰되기도 하고 집속이온빔을 이용한 가공공정에서 이온빔의 에너지가 작을 때 관찰되기도 한다. 이러한 스웰링 현상은 이온주입공정 후 열처리(annealing)공정을 거치면서 사라지고, 집속이온빔을 이용한 가공에서는 스웰링 높이가 수 nm 에 불과하여 가공 품질에 큰 영향을 미치지 않기 때문에 많은 연구가 진행되지는 않았다.¹ 그러나 나노미터 영역의 가공에 대한 연구가 진행되면서 수 nm 의 정밀도가 요구되고, 열처리 없이 재료의 비정질화를 일으키기 위해 이온주입을 할 경우 스웰링 현상에 대한 이해가 필요하다.

본 연구에서는 집속이온빔 공정에서 스웰링 현상에 대해 설명하고, 집속이온빔 가공조건인 가속전압(acceleration voltage)과 이온 도즈(ion dose)가 스웰링 현상에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다.

2. 스웰링 현상

스웰링은 이온이 주입될 때 주입된 이온에 의해 재료 내부의 결정구조가 변경되면서 재료 표면이 부풀어 오르는 현상이다. Fig. 1 은 재료내부에 이온이 주입되어 스웰링 현상이 일어나는 과정을 보여준다. 단결정으로 이루어진 재료에 에너지를 가지고 있는 이온이 주입되면 재료를 구성하는 원자들과 충돌하면서 재료 내부로 주입된다. 이온이 가지고 있는 에너지는 재료 내부의 원자들과 충돌하여 원자들의 위치를 이동시키거나 결합을 끊어 재료 내부에 결함(defect)를 생성한다.

이온이 계속 주입되면 재료를 구성하는 원자들의 결정구조가 바뀌어 국부적으로 비정질화되며 그 표면은 수 nm 정도 부풀어 오른다.^{2,3} 비정질 재료의 원자간의 결합에너지는 단결정 재료의 원자간 결합에너지보다 작기 때문에 비정질된 영역에 이온이 계속 주입되면 스웰링은 더 이상 일어나지 않고 표면은 스퍼터링된다.^{4,5} 따라서 스웰링 현상은 재료가 스퍼터링되는 에너지보다 작은 에너지의 이온이 주입될 때나 스퍼터링 된 부분 주위에 발생한다.

3. 실험

스웰링을 일으키기 위한 재료로 (100) 방향의 단결정 실리콘을 사용하였다. 실리콘 웨이퍼의 경우 공기 중에서 자연산화막을 형성하는데, 자연산화막의 경우 이온주입시

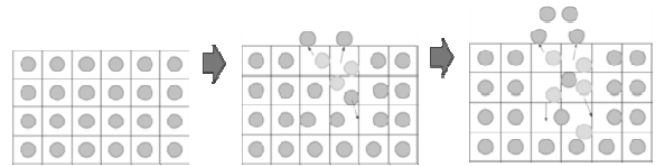


Fig. 1 Volume swelling principle expanded by Ga⁺ ions irradiated continually

Table 1 Experimental condition

| Parameter | Condition |
|----------------------|---|
| acceleration voltage | 5-30kV |
| ion dose | 0.01-0.35x10 ¹⁵ ions/cm ² |
| dwll time | 0.375 μsec |
| beam current | 3 pA |

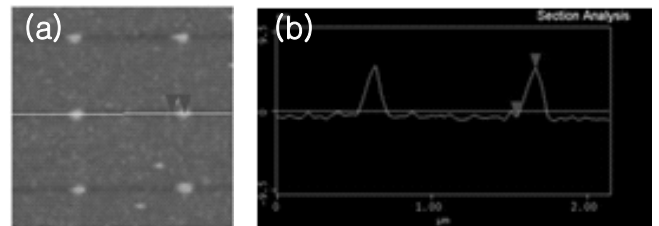


Fig. 2 Swelling image of SPM (a) SPM image of swelling on Si(100) (b) cross sectional image through the images of swelling

마스크(mask) 역할을 하여 이온주입을 막을 수 있다. 따라서 BOE (buffered oxide etcher, HF: H₂O = 1: 6)용액을 이용하여 자연산화막을 식각한 후, 탈이온수에서 세척 후 질소 가스 내에서 건조하였다. 이온주입은 집속이온빔 장비(SMI 3050, SII NanoTechnology Inc.)를 사용하였으며 실험 조건은 table 1 과 같이 설정하였다.

집속이온빔 공정의 가공 변수는 가속전압(acceleration voltage), 이온도즈(ion dose), 드웰타임(dwll time), 빔 커런트 (beam current) 등이다. 가속전압은 이온 소스인 갈륨(Ga, gallium)이온을 가속하는 전압으로 주입되는 이온의 에너지를 결정한다. 이온도즈는 단위면적당 이온의 수로 재료 내부에 주입되는 이온의 개수를 결정한다. 드웰타임은 이온빔이 한 픽셀에 머물러있는 시간을 말하며 빔커런트는 이온빔이 가지고 있는 전류 값을 말한다. 실험 조건을 세우기 위한 기초실험 결과 가속전압과 이온도즈가 드웰타임, 빔커런트보다 스웰링 현상에 더 큰 영향을 주었고, 본 연구에서는 가속전압과 이온도즈를 변화시키면서 스웰링을 측정하였다. 가속전압은 5-30kV 구간에서 5kV 단위로 설정하였으며 이온도즈는 기초실험결과 스퍼터링이 일어나기 시작하는 곳까지의 구간으로 설정하였다.

스웰링된 높이는 SPM(Scanning Probe Microscope)을 이용하여 측정하였다. Fig. 2 는 실제 스웰링된 표면과 그것의 단면을 SPM 을 이용하여 측정한 결과이다. Fig.2(a)는 집속이온빔을 이용하여 1μm 간격으로 스웰링을 일으킨 표면을 SPM 으로 측정한 그림이며 Fig.2(b)는 스웰링된 곳의 단면을 측정한 그림이다. 이온빔의 중첩 영향을 무시하기 위해 1μm 간격으로 스팟빔(spot beam)을 조사하였으며 각 실험 조건에서 스웰링 높이를 측정하였다.

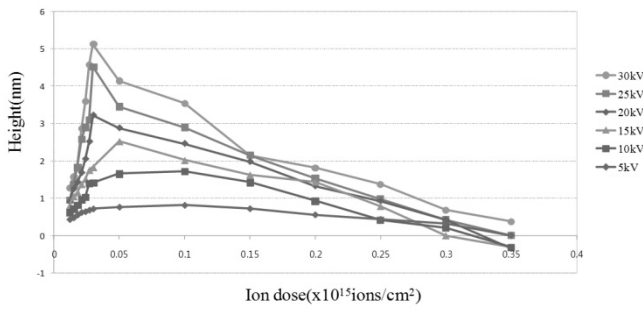


Fig. 3 Measured swelling heights of various acceleration voltages different ion doses

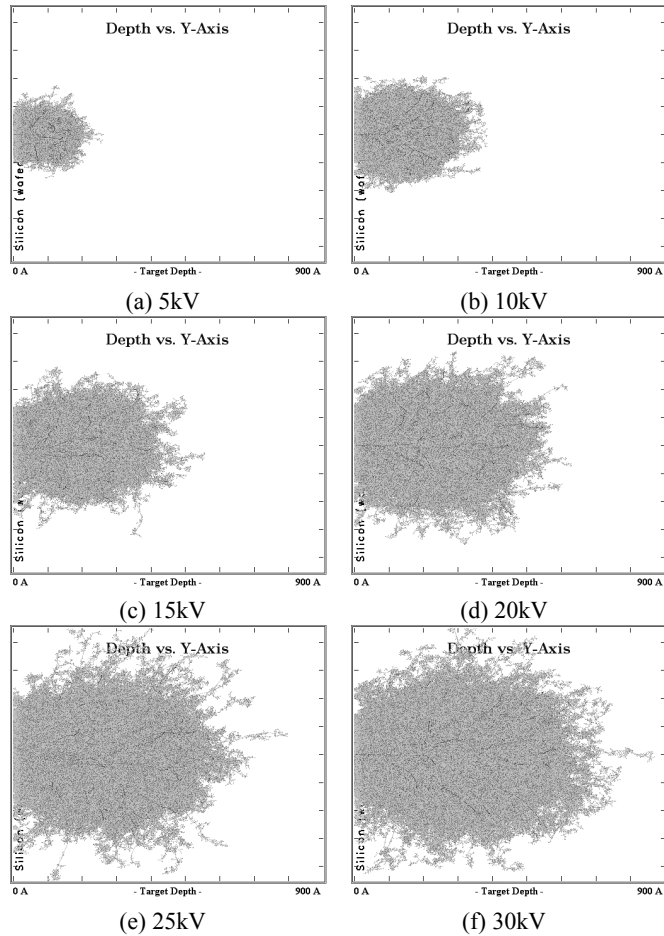


Fig. 4 Ion range distributions of Ga⁺ ions implanted along the Si / (100) direction from 5kV to 30kV using TRIM simulation

4. 결과 및 토의

실험 조건에 따라 스웰링 높이를 측정하였다. Fig. 3 은 5-30kV 의 가속전압에서 이온도즈를 변화시키면서 가공된 스웰링의 높이를 측정된 결과에 대한 그래프이다. 각 가속 전압에 대해 이온도즈가 변할 때 스웰링 높이의 변화 경향은 유사하였다. 최대 스웰링 높이는 30kV 가속전압에서 이온도즈가 0.03x10¹⁵ions/cm² 일 때 였으며, 그 때의 높이는 약 5.2nm 였다. 일정 이온도즈까지 스웰링 높이는 증가하였으며 그 이후 이온도즈가 증가하면서 스웰링 높이가 낮아지는 것을 알 수 있다. 이는 재료의 격자 내부에 이온이 주입되면서 비정질화가 일어나 스웰링 높이가 증가하다가 이온이 계속 주입되면서 비정질된 영역이 스퍼터링 되기 시작하기 때문이다. 가속전압의 경우 30kV 에서 스웰링 높이가 가장 높았다. 가속전압은 주입되는 이온의 에너지를 결정하는데, 이온의 에너지가 높을수록 이온 주입 깊이가 증가하여 재료가 비정질화 되는 영역이 증가하기 때문에 스웰링 높이가 증가하였음을 알 수 있다.

재료 내부에 이온이 주입될 때 재료 내부에서 비정질화가 되는 부분을 계산하기 위해 TRIM simulation 을 하였다. Fig. 4 는 (100) 방향 격자구조를 가지는 실리콘에 같은 도즈의 갈륨 이온이 5-30kV 의 가속전압으로 주입되었을 때의 재료 내부의 비정질화된 영역을 보여주는 TRIM simulation 결과이다. 각각의 시뮬레이션 결과에서 왼쪽 면이 재료의 표면이고 왼쪽 면의 중앙에서 이온이 해당에너지를 가지고 오른쪽으로 주입된다. 주입된 이온은 재료 내부에서 재료를 구성하는 원자들과 충돌하면서 재료내부의 원자들을 이동시키거나 결합을 변경시켜 비정질 영역을 만든다. 어두운 색으로 나타나는 부분은 이온 주입으로 인한 비정질 영역이다. 시뮬레이션 결과 주입되는 이온의 가속전압이 증가할수록 재료내부의 비정질화된 영역이 증가하는 것 알 수 있다. 따라서 같은 수의 이온이 주입될 경우 가속전압이 높아질수록 비정질 영역은 증가하고 그에 따라 스웰링 높이가 증가함을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 집속이온빔 공정에서 이온이 조사될 때 재료가 국부적으로 비정질화 되면서 표면이 부풀어 오르는 스웰링 현상에 대해 연구하였다. 기초실험을 통해 집속이온빔 가공 조건 중 스웰링에 미치는 영향이 큰 가속전압과 이온도즈에 관해 스웰링을 가공하였고 높이를 측정하여 가공조건에 따른 스웰링의 영향을 살펴보았다. 이온도즈가 증가하면서 스웰링 높이는 최대값을 가지다가 감소하였는데 이는 이온이 조사되면서 비정질 영역의 증가와 함께 스웰링이 증가하고, 그 이상의 이온 도즈에서는 재료 내부에 비정질화로 인한 결합에너지의 감소로 스퍼터링이 일어나기 시작하기 때문이다. 가속전압이 증가할수록 스웰링 높이가 증가하였는데 이는 가속전압이 증가할수록 이온의 주입 깊이와 비정질 영역의 면적이 증가하였기 때문이다. 스웰링 현상은 재료가 스퍼터링 될 수 있는 에너지보다 낮고 작은 수의 이온이 조사될 때 발생하였으며 가속전압과 이온도즈를 이용하여 스웰링 높이를 조절하여 수 nm 의 형상을 가지는 가공에 응용할 수 있을 것이다. 또한 스웰링이 많이 일어나면 재료 내부의 비정질 영역이 크므로 인위적으로 비정질영역을 만들어야 하는 가공 분야에도 응용될 수 있을 것이다. 현재 이온빔의 조사 각도, 재료의 결정방향 등 다른 가공 조건들과 스웰링 현상에 관한 실험이 진행 중이다.

참고문헌

1. C. Lehrer, L. Frey, S. Petersen, H. Rysse, "Limitations of focused ion beam nanomachining," Journal of Vacuum Science and Technology B, 2533-2538, 2001.
2. Ampere A Tseng, "Recent Developments in Nanofabrication Using Focused Ion Beams," Journal of Micromechanical and Micro engineering, 14, 15-34, 2004.
3. B. D. Huey, R. M. Langford, "Low-dose focused ion beam nanofabrication and characterization by atomic force microscopy," Nanotechnology, 14, 409-412, 2003.
4. P. K. Giri, V. Raineri, G. Franzo and E. Rimini, "Mechanism of swelling in low-energy ion-irradiated silicon," physical review B, 65, 012110 1-4, 2001.
5. J.B. Wang, A. Datta, Y.L. Wang, "Morphological changes of Si100/induced by focused ion beam irradiation," Applied Surface Science, 135, 29-136, 1998.