

## 집속이온빔 연마에 의한 패턴의 형태에 관한 연구

정원채<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> 경기대학교 전자공학과

### A Study on the Shape of the Pattern Milled Using FIB

Won-Chae Jung<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup> Department of Electronic Engineering, Kyonggi University, Suwon 440-760, Korea

(Received August 7, 2014; Revised October 16, 2014; Accepted October 24, 2014)

**Abstract:** For the measurements of surface shape milled using FIB (focused ion beam), the silicon bulk, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si, and Al/Si samples are used and observed the shapes milled from different sputtering rates, incident angles of Ga<sup>+</sup> ions bombardment, beam current, and target material. These conditions also can be influenced the sputtering rate, raster image, and milled shape. The fundamental ion–solid interactions of FIB milling are discussed and explained using TRIM programs (SRIM, TC, and T-dyn). The damaged layers caused by bombarding of Ga<sup>+</sup> ions were observed on the surface of target materials. The simulated results were shown a little bit deviation with the experimental data due to relatively small sputtering rate on the sample surface. The simulation results showed about 10.6% tolerance from the measured data at 200 pA. On the other hand, the improved analytical model of damaged layer was matched well with experimental XTEM (cross-sectional transmission electron microscopy) data.

**Keywords:** Focused ion beam, Sputtering, Scanning electron microscopy, Cross-sectional transmission electron microscopy, Computer simulation

#### 1. 서론

현재 집속이온빔 FIB (focus ion beam) 장치를 이용하여 반도체소자의 제작 후에 회로를 수선 또는 회로 간의 연결을 하고 수정작업을 할 수가 있고 나노 (nano) 스케일의 AFM (atomic forces microscopy)의 뾰족한 끝부분 (tip)을 만드는 것도 가능해졌다 [1,2]. FIB는 Ga<sup>+</sup> 이온빔으로 1 pA에서 수십 nA의 이온빔

전류 세기로 샘플의 표면을 연마하여 다양한 형태의 3차원 (three-dimensional) 소자 제작과 연마된 단면 및 구조들을 주사이온현미경 SIM (scanning ion microscopy)이나 주사전자현미경 SEM (scanning electron microscopy)을 사용하여 샘플의 표면의 형상을 측정할 수가 있다. SIM은 Ga 이온이 실리콘보다 더 무겁기 때문에 recoiling 효과가 나타난다. 또한, 연마된 샘플 위에 추가적인 손상영역이 생긴다. 샘플의 형상 가공처리 속도를 향상시키기 위해서는 FIB 장치에서 단지 Ga<sup>+</sup> 이온빔의 전류를 크게 하는 것이 가장 용이한 방법이다.

a. Corresponding author: [wjung@kgu.ac.kr](mailto:wjung@kgu.ac.kr)

Copyright ©2014 KIEEME. All rights reserved.  
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 2. 실험 방법

그림 1에서 6은 Si,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , Al의 샘플에서 빔 전류가 700 pA에서 시작하여 14 nA로 마치는 동안에 대각선 방향으로 연마된 형태들을 나타내고 있다. FIB 연마 후에 나타난 샘플들의 형태는 주사전자현미경(SEM)으로 측정하였다. 그림 1에서 6까지 나타난 것처럼 샘플들은 각각  $4.6 \times 5 \times 3 \mu\text{m}$ 의 크기로 연마하였다. 본 실험에 사용된 FIB 장비는 Seico사의 SMI 3050TB 모델로서 전자빔과 이온빔을 가지는 dual beam을 가지는 장치를 이용하였다.

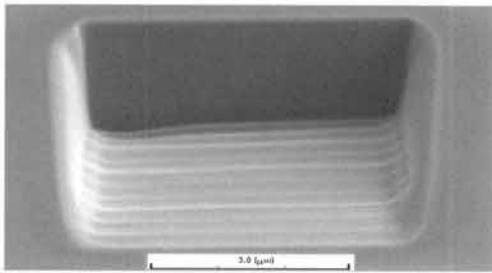


Fig. 1. Image of silicon surface at vertical incident of  $\text{Ga}^+$  using FIB.

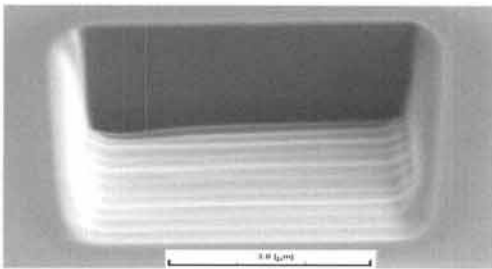


Fig. 2. Image of silicon surface at  $45^\circ$  tilting incident  $\text{Ga}^+$  using FIB.

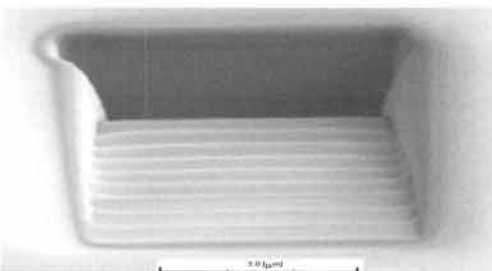


Fig. 3. Image of silicon nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) surface at vertical incident of  $\text{Ga}^+$  using FIB.

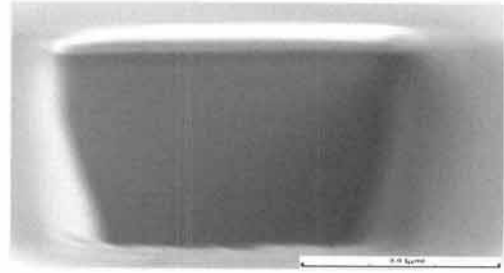


Fig. 4. Image of silicon nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) surface at  $45^\circ$  tilting incident of  $\text{Ga}^+$  using FIB.

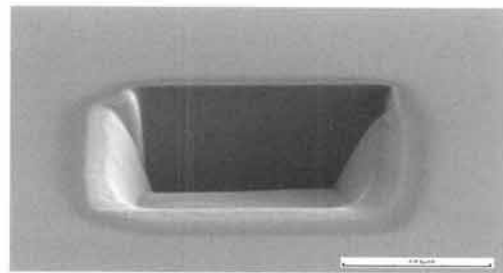


Fig. 5. Image of aluminium surface at vertical incident of  $\text{Ga}^+$  using FIB.

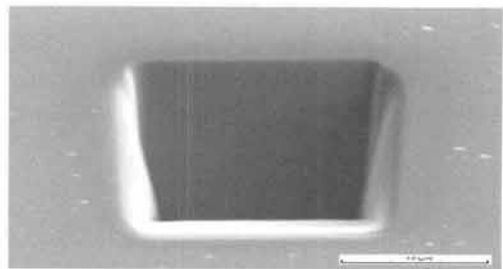


Fig. 6. Image of aluminium surface at  $45^\circ$  tilting incident of  $\text{Ga}^+$  using FIB.

연마 후에 샘플의 top 표면에서 수직으로 샘플의 내부가 연마되는 것이 아니고 둥그스름한 round 형태로 측정되는 이유는  $\text{Ga}^+$  sputtering 효과에 의한 손상영역 때문이다. [2-10].

그림 4와 6에서  $45^\circ$ 로 tilt한 Ga 빔이 입사한 경우와  $0^\circ$ 일 때와 서로 비교하여 보면 tilt한 경우가 홈이 파진 경계면 주위가 많이 연마되어서 표면의 테두리 경계면이 더 많이 완만한 형태를 하고 있음을 알 수가 있다.

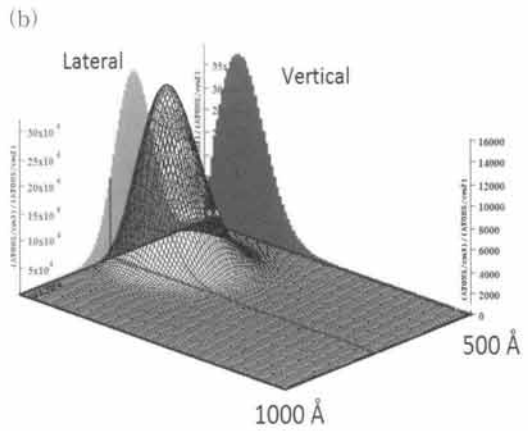
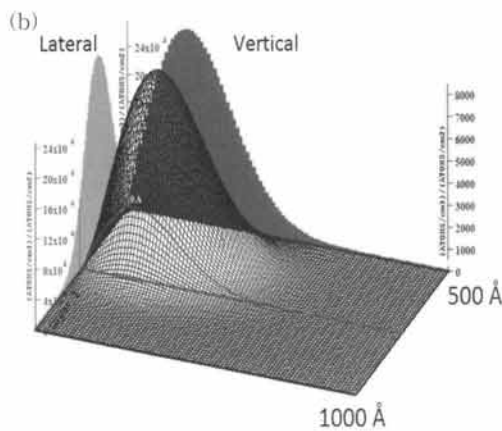
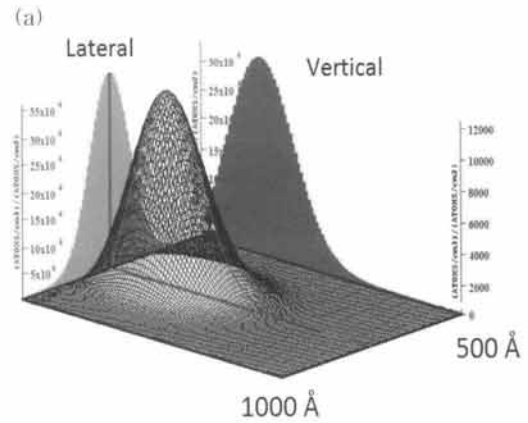
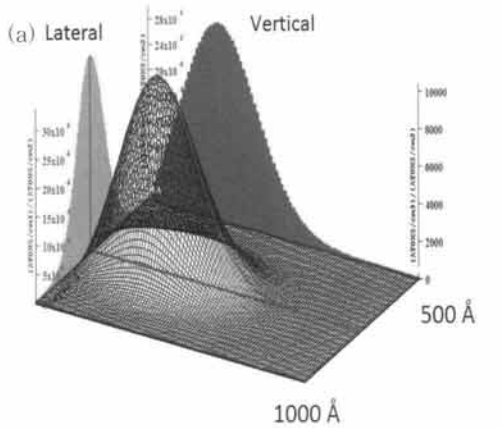


Fig. 7. Three-dimensional Ga distributions at (a) 0° and (b) 45° incident into silicon using SRIM.

Fig. 8. Three-dimensional Ga distributions at (a) 0° and (b) 45° incident into aluminium using SRIM.

그림 3과 5는 샘플의 바닥면이 보이지 않는데 반해서 45° 입사각의 경사 때문에 바닥이 보이는 형태를 그림 4와 그림 6에서 각각 나타내고 있다.

그림 5와 6은 알루미늄의 표면 형상을 수직방향과 45° tilt하여 Ga<sup>+</sup> 이온빔을 조사하였을 때의 형상을 각각 나타내고 있다. 그림 6에서는 경사진 면의 바닥면을 관찰할 수가 있다.

그림 7~9는 SRIM 2013 simulation [3-7]을 사용하여 서로 다른 기관에 수직방향 및 측면방향의 분포를 포함하는 Ga 이온의 3차원 분포들을 나타내고 있다. Ga 빔이 45°로 입사한 경우가 0°일 때 보다 더 표면에 접근해 있는 분포들을 나타내고 있다. 차이점은 서로 다른 샘플들이기 때문에 수직 및 측면 방향으로의 range 데이터가 서로 다르기 때문에 다른

분포를 나타내고 있다. 따라서 서로 다른 각도와 연마 조건 때문에 SEM으로 측정된 그림 결과들도 다른 형상들을 나타내고 있다.

그림 10에서 그림 13은 FIB를 사용하여 700 pA의 Ga 이온빔 전류로 각각 3×2×2 μm 샘플의 크기로 연마하였다. 연마 후에 후방 산란된 전자빔을 이용한 SEM으로 샘플들의 image를 side view와 top view로 각각 측정하였다.

그림 10은 0°의 각도로 연마된 Al/silicon의 구조를 위에서 수직방향으로 측정한 그림으로서, 그림 11 및 12에서 측정된 것처럼 실리콘의 표면과는 다르게 표면이 매끄럽지 않고 거친 부분은 알루미늄의 표면조직을 잘 나타내고 있고 연마된 샘플의 테두리 부분의 손상영역과 바닥 부분도 그림 10의 (b)에서 잘 나타내고 있다.

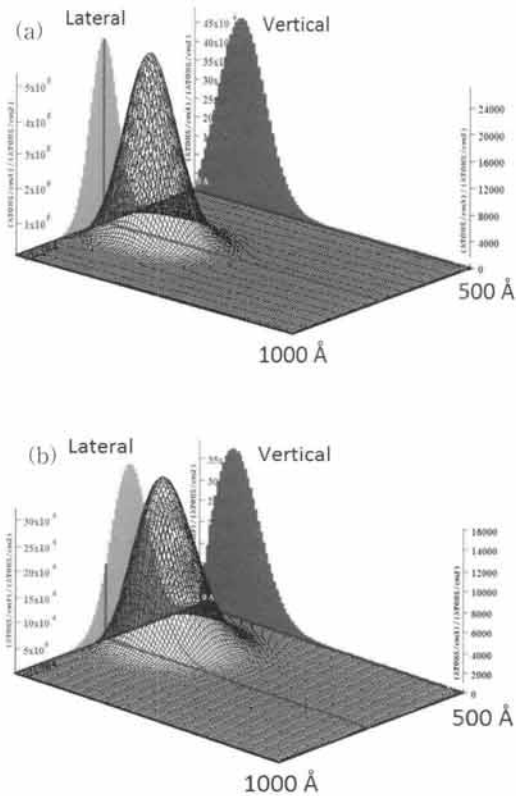


Fig. 9. Ga ion distribution at (a) 0° and (b) 45° incident into Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> using SRIM.

그림 11은 0°의 각도로 연마된 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/silicon의 구조에서 SEM으로 측정된 그림으로서, side view는 바닥면이 보이지 않지만 top view는 실리콘 표면과는 다르게 밝게 하얗게 보이는 부분은 절연 층인 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>층이 전자빔 조사에 의한 charging 효과 때문에 서로 다른 contrast를 나타내어 회미한 밝은 부분의 표면조직을 나타내고 있고 연마된 샘플의 테두리 부분의 손상영역과 연마된 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 바닥 부분은 잘 나타내고 있다. 또한 테두리 부분에서 확연히 더 두꺼운 손상영역을 나타내고 있다.

FIB를 사용하여 연마된 실리콘의 side면과 top view를 측정된 SEM의 image는 그림 12에 나타내었다. 측면을 측정하였기 때문에 실리콘의 비스듬하게 연마된 실리콘의 바닥면도 보이고 경사진 바닥면이 완전하게 연마되지 않고 미량의 실리콘이 남아 있는 부분도 볼 수가 있다. 그러나 top view는 정면에서 바라본 SEM image이기 때문에 테두리의 4면이 거의 균일하게 손상된 영역 즉 비정질 실리콘 층을 나타내고 있다.

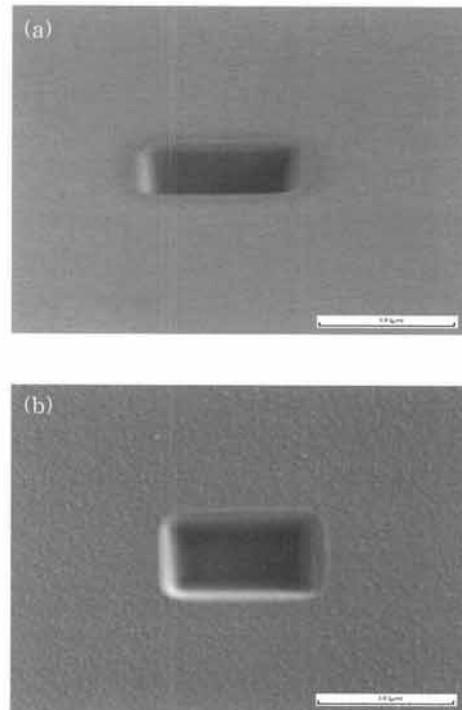


Fig. 10. Side (a) and top (b) view of three-dimensional milled image at 0° incident into Al/silicon.

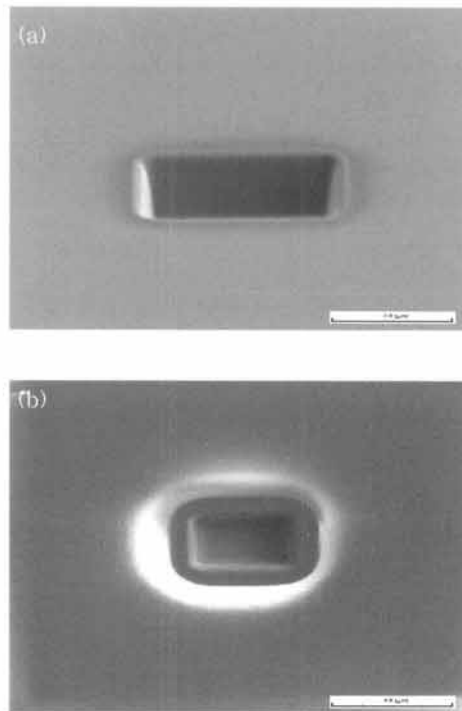


Fig. 11. Side (a) and top (b) view of three-dimensional milled image at 0° incident into Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/silicon.

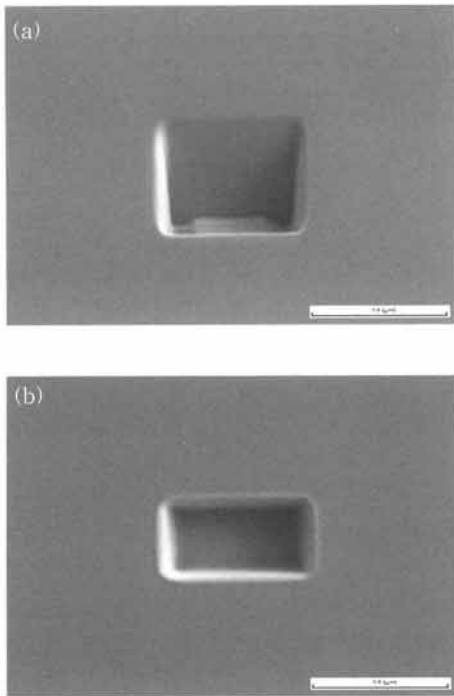


Fig. 12. Side (a) and top (b) view of three-dimensional milled image at 0° incident into silicon.

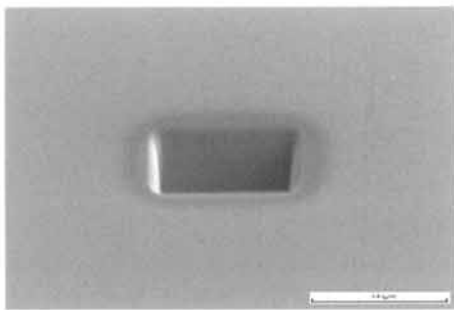


Fig. 13. Top view of three-dimensional milled image at 45° incident into silicon.

45°의 각도로 FIB를 사용하여 연마된 실리콘의 top view면을 측정된 SEM의 image를 그림 13에 나타내었다. 그림 12와는 달리 측면의 형상을 전혀 볼 수 없고, 연마된 실리콘의 파여진 홈의 바닥면도 나타나 있지 않다. 측면 손상영역은 Ga 이온빔의 transverse scattering에 중속되어 있다. 일반적으로 30 keV로 연마된 후에 단면을 polishing하기 위해서는 낮은 에너지인 1~2 keV에서 낮은 빔 전류를 이용하면 손상영역을 피할 수가 있다.

### 3. 결과 및 고찰

샘플의 TEM 분석을 위해서 표면의 인위적인 손상된 영역을 방지하기 위해서, top surface의 손상은 FIB 연마하기 전에 샘플의 표면 위에 무거운 금속층을 coating함으로써 피할 수가 있다. 그러나 side wall의 손상영역은 FIB에 의해서 연마된 샘플에서는 피할 수 없이 반드시 나타나게 된다. Ga 이온빔의 0°에서와 45°의 입사각에 대한 Si, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al의 샘플에서 각각의 sputtering yield를 t-dyn (TRIM dynamic) [3-7]의 시뮬레이션 결과를 그림 14에 나타내고 있다. 스퍼터링 수율은 Si < Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> < Al의 크기로 나타내고 있다. Dose가 10<sup>18</sup> cm<sup>-2</sup> 이상일 때 sputtering yield는 0°에서 보다 45°에서 대략 2배 정도가 됨을 그림 14에서 확인할 수가 있다.

SRIM 컴퓨터시뮬레이션의 결과로부터 실험 data와 일치하는 수식은 top surface인 경우 손상영역은  $D_{top} = R_p + 3 \Delta R_p$ 이고, side wall의 손상영역은 [14]에서 발표된 것처럼  $D_{side} = 3 \Delta R_t$ 의 수식으로 그림 15에 나타내었다.

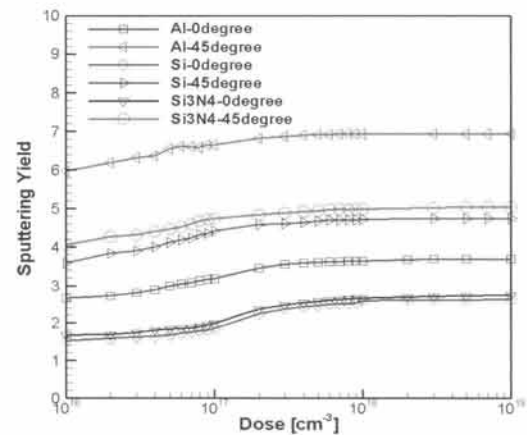


Fig. 14. Sputtering yield obtained from t-dyn simulation at 0° and 45° incident angles in three different materials using Ga<sup>+</sup> beam.

FIB 연마 동안에 Ga<sup>+</sup> 이온에 의해서 야기된 측면의 손상영역을 그림 15에 나타내었다. 실리콘의 측면 손상영역 층이 나타나는데 이는 피할 수 없는 현상으로써, 실험 결과들과 비교하여 SRIM을 사용하여 측면 손상영역은  $D_{side} = 3 \Delta R_t$ 의 수식 [14]으로 나타내었다.

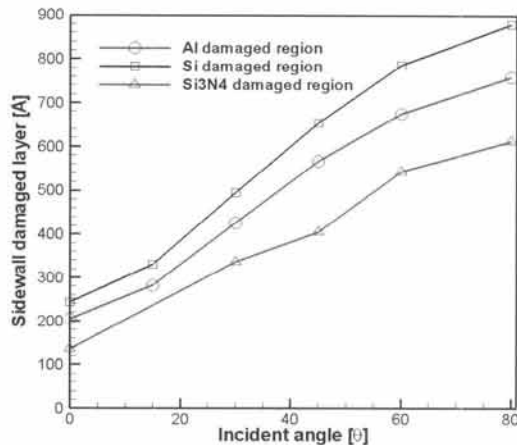


Fig. 15. Sidewall damaged layers obtained from t-dyn simulation results between 0° and 80° incident angles in three different materials.

Table 1. Sputtering rates in three different samples using Ga<sup>+</sup> beam.

Beam energy: 30 keV, Ion beam: Ga, Incident angle 0°, Samples: Al, Si, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> substrates		
Sputtered materials		
Atomic weight	Name	Milling rates (μm <sup>3</sup> nA <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )
26.98	Aluminium	0.379(0.36)
28.085	Silicon	0.15(0.178)
140.255	Silicon Nitride	0.21(0.24)

표 1은 Y. Liao의 실험 데이터 [17]와 본 실험에서의 결과 (표 1에서 괄호 안의 데이터)를 서로 비교하여 나타내었다. 실험 결과는 시뮬레이션에서 다소 작은 값의 스퍼터링 수율 때문에 약간의 차이가 있지만 대체로 잘 일치하는 편이다.

실리콘기판 표면 위에 직접적인 손상을 피하기 위해서 다양한 금속 층을 증착시킨 후에 Ga 이온의 조사 후에 side면을 XTEM으로 측정한 결과들은 광범위하게 이미 발표되었다 [11-16]. 실리콘기판 위에 tantalum의 두께가 2,000 Å인 Ta/Si의 구조를 200 pA의 이온빔 전류로 약 15°의 입사각으로 연마된 측면의 손상영역으로서, 비정질 실리콘의 두께는 36.92 nm가 나타남을 그림 16(a)의 XTEM 결과로부터 알 수가 있었다.

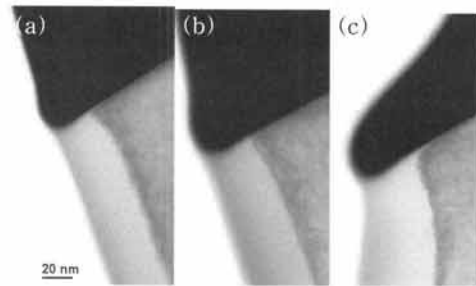


Fig. 16. Side view of damaged distributions (a) 36.92 nm, (b) 37.9 nm, and (c) 43.1 nm at 15° incident into silicon using XTEM.

그림 15에서 동일한 조건에서 SRIM data를 이용한 해석적인 결과는 33 nm이고, 실험 데이터와 비교하여 10.6%의 오차를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 [14]의 수식을 다소 수정하여  $D_{side} = 3.36 \Delta R_i$ 의 수식으로 실험 데이터와 완벽하게 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 1,250 pA의 이온빔 전류로 같은 입사각 조사인 경우는 연마된 측면의 손상영역으로서, 즉 비정질 실리콘의 두께는 약간 증가된 37.9 nm를 그림 16(b)에서 확인할 수가 있었다. 그러나 매우 높은 5,000 pA의 이온빔 전류로 같은 입사각으로 조사된 경우는 연마된 측면의 손상영역 즉, 비정질 실리콘의 두께는 다소 더 큰 값인 43.1 nm를 그림 16(c)에 나타내었다. 또한, 매우 높은 빔 전류에서 Ga 이온빔 연마 동안에 실리콘 샘플이 균일하지 않고 휘어지는 결과를 나타내고 있음을 확인할 수가 있었다.

그림 16에서 비정질 실리콘의 두께는 Ga 이온빔의 전류 값이 대략 1,000 pA 이하의 경우에는 그림 15의 시뮬레이션 결과와 유사함을 알 수 있다. 그러나 매우 높은 Ga 이온빔 전류의 조건하에서는 실리콘기판이 휘어지는 결과로 말미암아 손상영역으로서, 즉 비정질 실리콘의 두께는 더 커지게 되고 실험 결과는 그림 15의 t-dyn 컴퓨터시뮬레이션을 통한 해석적인 데이터보다 더 큰 값을 나타내는 결과를 나타내었다.

#### 4. 결론

서로 다른 Al/Si, Si, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Si의 샘플에 Ga<sup>+</sup> 이온빔을 입사각이 0° 및 45°에서 30 keV의 에너지로 각각 조사하여 샘플들의 표면구조와 실리콘의 비정질 층의 두께, sputtering rate를 실험 결과와 T-dyn과 SRIM

을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 결과들과 서로 비교하여 그림으로 나타내었다. XTEM의 결과와 SRIM 시뮬레이션으로 부터 얻어진 사정거리 데이터를 이용하여 측면방향으로 이온빔 손상영역인 비정질 실리콘의 두께는 본 연구에서는 [14]의 수식을 다소 수정하여  $D_{\text{side}} = 3.36 \Delta R_1$ 의 수식으로 나타내었고, 이 결과는 실험 데이터와 잘 일치함을 알 수 있었다. 200 pA ~ 5,000 pA의 빔 전류에서 실리콘에서 비정질 층의 두께 (nm)는 fitting curve를 통하여  $x(\text{두께}) = 0.0013 A(\text{빔 전류}) + 36.482$ 의 수식으로 나타낼 수가 있다. 그러나 가속시킨  $\text{Ga}^+$  이온빔의 전류 세기에 따라서 비정질화된 층의 두께와 모양이 다소 변함을 확인하였다. 측면 방향의 손상영역 모델은 실험 데이터와 잘 일치하기 때문에 본 실험 결과는 다양한 샘플의 구조의 단면에서 손상영역의 분포를 예측할 수가 있고 신뢰할 수 있는 컴퓨터 시뮬레이션 공정조건을 확립할 수 있다고 사료된다. 또한, 얻어진 3-D 구조와 비정질 층의 두께에 대한 조건은 나노 및 특별한 구조의 반도체 소자 제작에 본 실험 데이터가 적용이 될 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 2012학년도 경기대학교 학술연구비 (일반연구과제) 지원에 의하여 수행되었음.

### REFERENCES

- [1] G. Wilkening and L. Koenders, *Nanoscale Calibration Standards and Methods* (Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., KGaA, 2005) p. 311.
- [2] A. A. Tseng, *Nanofabrication Fundamentals and Applications* (World Scientific, New Jersey, 2008) p. 544.
- [3] J. P. Biersack, S. Berg, and C. Nender, *Nucl. Instrum. Methods B*, 59, 21 (1991).
- [4] W. Möller, W. Eckstein, and J. P. Biersack, *Comp. Phys. Commun.*, 51, 355, (1998).
- [5] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and U. Littmark, *The Stopping and Range of Ions in Solids* (Pergamon, New York, 1985).
- [6] W. Möller and W. Eckstein, *Nucl. Instrum. Methods B*, 2, 814, (1984).
- [7] W. Eckstein, *Computer Simulation of Ion-Solid Interactions* (Springer, Berlin 1991).
- [8] B. I. Prenitzer, C. A. Urbanik-Shannon, L. A. Giannuzzi, S. R. Brown, R. B. Irwin, T. L. Shofner, and F. A. Stevie, *Microscopy and Microanalysis*, 9, 216 (2003). DOI:10.1017/S1431922760030034
- [9] C. Lehrer, L. Frey, M. Mizutani, M. Takai, and H. Ryssel, *Ion Implantation Technology Conference* (IEEE, Alpbach, 2000) p. 695.
- [10] H. Gnaser, A. Brodyanski, and B. Reuscher, *Surf. Interface Anal.*, 40, 1415 (2008).
- [11] J. P. McCaffrey, M. W. Phaneuf, and L. D. Madsen, *Ultramicroscopy*, 87, 97 (2001).
- [12] K. S. Ko, W. C. Jung, J. Chung, and L. Rabenberg, *Microsc. Microanal.*, 10, 1170 (2004).
- [13] Z. Wang, T. Kato, T. Hirayama, N. Kato, K. Sasaki, and H. Saka, *Appl. Surf. Sci.*, 241, 80 (2005).
- [14] J. Takamatsu, T. Koike, Y. Kato, H. Sunaoshi, and K. Hattori, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 35, 6415 (1996).
- [15] C. J. Anthony, G. Torricelli, P. D. Prewett, D. Cheneler, C. Binns, and A. Sabouri, *J. of Micromech. and Microeng.*, 21, 1 (2011).
- [16] J. Orloff, M. Utlau, and L. Swanson, *High Resolution Focused Ion Beams* (Kluwer Academic Pub., New York, 2003) p. 205.
- [17] Y. Liao, *Practical Electron Microscopy and Data Base*, 2454 (2007).