

나노인덴터 압입팁의 특성에 따른 표면 이미지 오차 연구

김수인^a · 이찬미^b · 이창우^{a*}

^a국민대학교 나노전자물리학과, 서울 136-702

^b풍문여자고등학교, 서울 110-240

(2009년 8월 24일 받음, 2009년 9월 10일 수정, 2009년 9월 14일 확정)

선폭의 감소와 소자 집적도의 증가로 인하여 향후 현재 사용되고 있는 탑-다운(Top-down) 생산방식에서 바텀-업(Bottom-up) 방식의 소자 생산이 예상되고 있으며, 이와 관련된 연구가 활발히 진행 중에 있다. 대표적으로 나노와이어(Nanowire)와 나노벨트(Nanobelt)를 이용한 소자 개발이 한 대안이며, 이러한 소자 개발을 위해 물질의 물성 특성 연구를 위하여 나노인덴터를 이용한 물성 연구가 진행 중이다. 특히 나노인덴터는 나노 크기의 구조물에 대한 연구를 위하여 부가적으로 원자현미경(AFM: atomic force microscope) 기능을 제공하며, 이를 통하여 얻어진 표면 이미지를 이용하여 나노 구조물의 정확한 위치에 대한 물성 정보를 제공하게 된다. 그러나 나노인덴터에서 사용되는 팁(tip)은 기존의 원자현미경에서 사용되는 팁에 비하여 상대적 크기가 상당히 큰 특징이 있어 나노인덴터에 의한 표면 이미지에는 상당한 오차가 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 나노인덴터에서 대표적으로 사용되는 50nm 벌코비치 팁(Berkovich tip)과 1um 90° 원뿔형 팁(Conical tip)을 이용하였으며, 각 팁에 대한 표면 특성을 확인하기 위하여 박막 표면을 각 팁으로 압입하여 압입 후 표면 영상과 압입 깊이를 통하여 팁의 특성을 확인하였다. 이후 나노인덴터를 이용하여 100nm급 나노 구조물에서 표면 주사를 실시하여 획득된 이미지와 기존 원자현미경을 이용한 표면 이미지를 비교하여 오차를 획득하였다. 또한 각 팁의 외형으로 이론적으로 계산된 오차와 비교하였다.

주제어 : 표면 이미지 오차, 나노인덴터, 벌코비치 팁(Berkovich tip), 원뿔형 팁(Conical tip)

I. 서 론

현대의 반도체 공정에서 선폭은 점점 감소하고 소자는 점점 고집적화 되어가고 있다 [1-2]. 이에 따라 현재 사용되고 있는 소자 생산 방식인 탑-다운 방식 보다는 향후 좀 더 미세한 구조물도 만들 수 있는 바텀-업 방식의 소자 생산이 활발해질 것으로 예상되고 있다 [3]. 그리고 이에 따라 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있는데, 대표적으로 나노와이어와 나노벨트를 이용한 소자 개발이 한 대안이다 [4-5]. 이러한 소자들을 개발하기 위해서는 여러 가지 물질의 물성 특성을 알아보는 것이 중요한데 이 때 나노인덴터를 이용해서 연구를 진행한다. 이 나노인덴터는 미세한 팁을 이용해서 압입하거나 표면을 긁는 등 여러 실험을 통해 물질의 특성을 알아보는데, 이렇게 팁으로 표면에 근접하여 팁의 위치를 알 수 있다는 점에서 원자현미경 기능을 수행할 수 있다 [6]. 이 기능을 이용하여 표면 이미지를 얻은 후 그 이미지 상으로 표면 구조물이 어디에 어떤

상태로 있는지 정확히 알 수 있다 [7]. 그러나 이 나노인덴터의 원자현미경 기능을 이용해 표면 이미지를 얻게 되면 기존 원자현미경에서 사용되는 캔틸레버(Cantilever)의 크기보다 나노인덴터의 압입자가 훨씬 크기 때문에 나노인덴터로 얻은 표면 이미지에는 상당한 오차가 존재한다.

따라서 본 연구에서는 나노인덴터에서 대표적으로 가장 빈번히 사용되는 벌코비치 팁과 원뿔형 팁을 이용하였으며, 각 팁으로 얻은 표면 이미지에 따른 표면 특성을 해석하기 위해서 박막 표면을 각 팁으로 압입하여 압입 후 압흔의 형태와 압입 깊이를 통하여 팁의 형태적 특성을 확인하였다. 이후 나노인덴터를 이용하여 100nm급 나노 구조물에서 표면 주사를 실시하여 얻은 이미지와 기존 원자현미경을 이용한 표면 이미지를 비교하여 오차를 구하였다. 또한 각 팁의 외형으로 이론적으로 계산된 오차와 비교하였다.

* [전자우편] cwlee@kookmin.ac.kr

II. 실험

먼저 나노인덴터에서 표면 이미지를 얻었을 때에 이 이미지에서 팁의 형태에 따른 어떤 오차를 확인하였다. 본 실험에서 사용되는 벌코비치 팁과 원통형 팁의 기하학적 형태를 확인하기 위하여 각 팁을 석영기판(quartz substrate)에 최대 압입력을 9000 μN 로 인덴테를 실시하여 압입 하중 곡선을 획득하여 압흔의 최대 깊이를 확인 하였고, 이후 표면은 나노인덴터의 표면스캔(surface scan) 기능을 이용하여 석영기판 표면에 형성된 각 팁의 압흔 외곽 크기를 확인하였다. 다음으로 실리콘(silicon) 기판위에 형성된 다결정실리콘(Poly-Si) 패터를 이용하여 실제 나노인덴터와 원자현미경 등 각각의 측정 장치를 이용하여 표면 이미지를 획득하였다. 이때, 여러 배율에 대해서 표면의 이미지를 얻는데, $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$ 의 정사각형 부분을 팁의 선속도가 $20\ \mu\text{m/s}$ 으로, $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 의 정사각형 부분을 팁의 선속도가 $10\ \mu\text{m/s}$ 으로, $5\ \mu\text{m} \times 5\ \mu\text{m}$ 의 정사각형 부분을 팁의 선속도가 $5\ \mu\text{m/s}$ 으로 표면의 이미지를 원자현미경의 쉐르레버와 나노인덴터의 벌코비치 팁과 원통형 팁으로 각각 표면 이미지를 얻었다. 이렇게 획득된 시료의 단면을 확인하여 원자현미경의 쉐르레버로 측정된 결과를 기준으로 나노인덴터의 벌코비치 팁과 원통형 팁으로 측정된 결과를 비교하여 그 오차를 연구하였다.

III. 결과 및 고찰

본 실험에서 사용된 벌코비치 팁과 원통형 팁의 기하학적인 모형을 제시하기 위하여 두 팁에 대하여 석영기판에 압입력을 9000 μN 으로 압입한 후 표면 이미지(Fig. 1(a), Fig. 3(a))와 압입-하중 곡선(Fig. 1(b), Fig. 3(b))을 이용하여 팁의 기하학적 모형을 계산하였다.

Fig. 1로부터 석영기판에 압입된 깊이는 약 $0.1211\ \mu\text{m}$, 팁의 끝에서 base에 내린 수선의 발과 base의 한 선분까지의 거리는 약 $0.3050\ \mu\text{m}$ 였고 수선의 발로부터 base의 한 꼭짓점까지의 거리는 약 $1.101\ \mu\text{m}$ 였다는 것을 알 수 있다. 벌코비치 팁을 옆면이 모두 합동인 사면체로 고려하였다.

$$\tan \alpha = \frac{1.101\ \mu\text{m}}{0.1211\ \mu\text{m}} = 9.092,$$

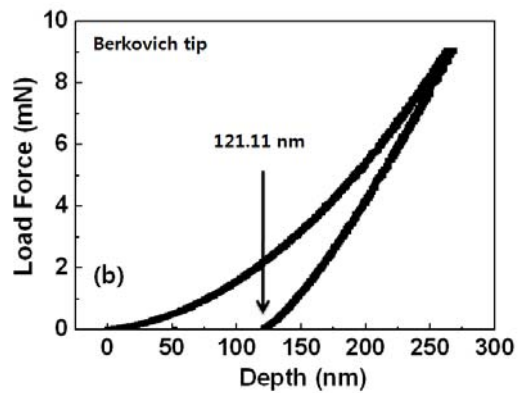
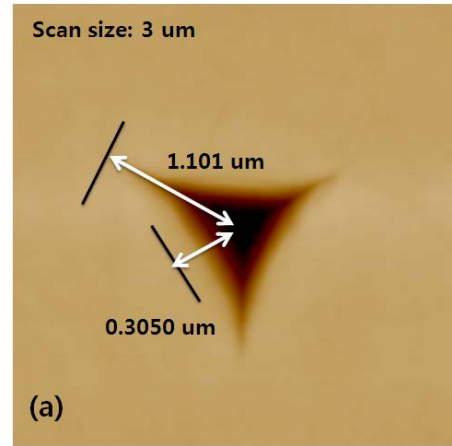


Figure 1. Surface image of quartz indented by berkovich tip (a), and Depth vs Load Force Graph (b).

$$\tan \beta = \frac{0.3050\ \mu\text{m}}{0.1211\ \mu\text{m}} = 2.519$$

Fig. 2는 벌코비치 팁의 모식도를 나타낸 것으로 실험에서 사용된 팁의 α 와 β 의 값은 각각 83.72° 와 68.34° 로 계산된다. 실제 벌코비치 팁의 끝은 둥근 모형이나 계산의 편의를 위하여 뿔로 근사하였다. 실제 원자현미경 모드로 시료의 표면을 스캔할 때 벌코비치 팁의 비대칭인 기하학적 구조로 인하여 설치된 벌코비치의 방향에 따라서도 다른 데이터를 얻을 수도 있다.

같은 방법으로 원통형 팁에 대해서 동일한 과정을 시행하였다. 원통형 팁을 indentation과정을 거친 후 마찬가지로 얻은 압입 - 하중곡선과 표면의 이미지를 통해서 근사적인 원통형 팁의 기하학적 구조를 추측하였다. 실제 원통형 팁의 끝은 벌코비치와 마찬가지로 둥근 모양이나 역시 계산의 편의를 위하여 원뿔로 근사하였다. Fig. 3은 원통

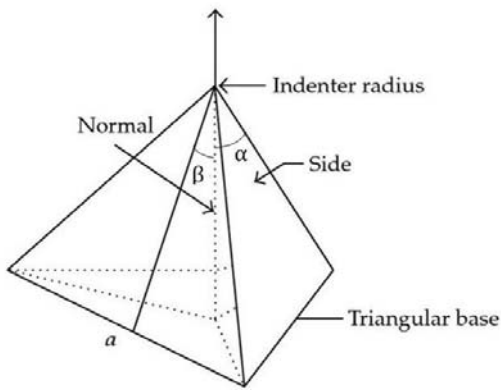


Figure 2. Simple diagram of berkovich tip.

형 팁을 사용하여 얻은 압입 후 표면 이미지와 압입 - 하중 곡선이다. Fig. 3(a)를 이용하여 석영기판과 접촉하는 팁의 반지름의 값을 얻을 수 있으며 Fig. 3(b)에서 얻은 압흔의 깊이 데이터를 통해 얻은 접촉 길이를 통해서 근사적인 모양을 추측할 수 있다. 실험에 사용된 원통형 팁의 개형을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3(a), Fig. 3(b)의 그래프를 통

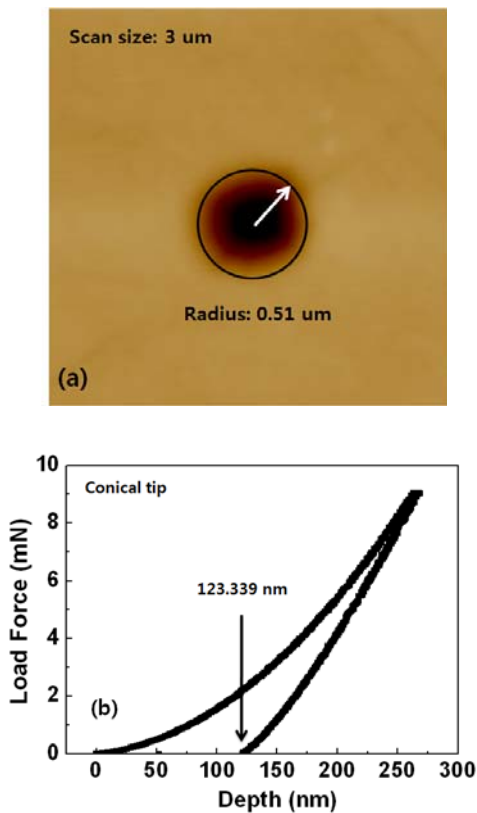


Figure 3. Surface image of quartz indented by Conical tip (a), and Depth vs Load Force Graph (b).

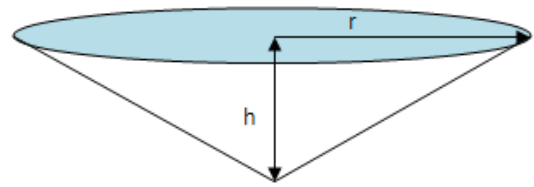


Figure 4. Simple diagram of conical tip.

해 얻은 반지름(r)과 압입된 깊이(h)의 값은 각각 $0.51 \mu\text{m}$ 와 $123.339 \mu\text{m}$ 이고 연직선과 모선 사이의 각도는 76.40° 로 계산 되었다.

벌코비치 팁과 원통형 팁으로 표면 스캔으로 형성된 패턴 이미지의 실제 오차와 팁의 기하학적 모형으로 계산된 오차의 차이를 확인하기 위하여 실리콘 기판위에 다결정 실리콘 패턴을 형성하여 원자현미경으로 확인한 이미지를 기준으로 오차를 확인하였다.

Fig. 5(a), Fig. 5(b), Fig. 5(c)는 원자현미경 팁(a), 벌코비치 팁(b), 원통형 팁(c)으로 형성된 표면 이미지를 나타낸 그림으로 스캔 크기(scan size)는 $2 \mu\text{m}$ 로 스캔 비(scan rate)는 0.5 Hz 로 하여 나타낸 그림이다. 또한 Fig. 6의 (a)에서 Fig. 6(c)는 Fig. 5 각각의 단면을 나타낸 그림이다. Fig. 6에서 연직선과 각도 θ 를 이루는 모서리 또는 면이 실리콘 패턴을 스캔할 때 스캔하는 팁의 기하학적 구

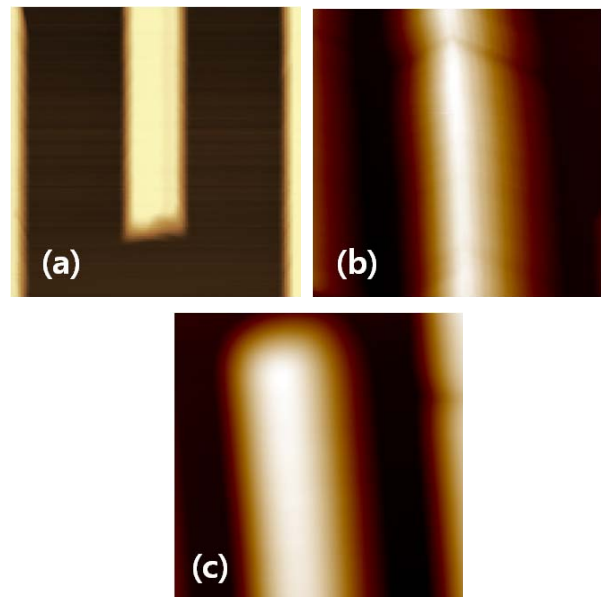


Figure 5. Surface images of each equipment; (a) SPM tip, (b) berkovich tip, and (c) conical tip.

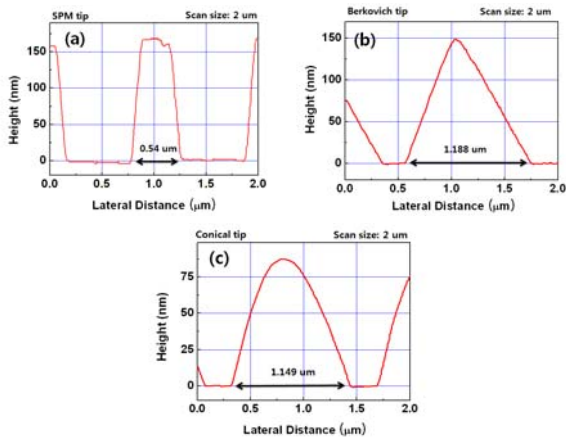


Figure 6. Depth curves of each equipment; (a) SPM tip, (b) berkovich tip, and (c) conical tip.

조에 의해서 오차가 발생한다. 동일한 형태의 다결정 실리콘 패턴에 대하여 벌코비치 팁과 원통형 팁을 이용하여 각각 표면을 스캔하였을 때 벌코비치 팁을 이용하여 측정된 패턴의 두께는 1.188 μm, 원통형 팁을 이용하여 측정된 패턴의 두께는 1.1491 μm이었다.

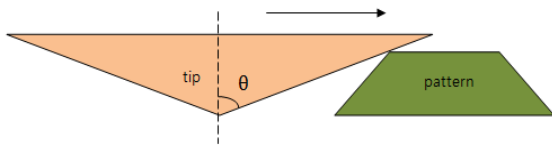


Figure 7. Simple diagram causing error.

Fig. 7은 팁을 사용하여 패턴을 스캔할 때 생기는 오차를 설명해준다. 팁은 패턴의 높이에 비해 훨씬 큰 크기를 갖기 때문에 표면이 더 넓은 것으로 인식하고 오차가 생긴다. 따라서 팁의 연직선과 모서리 또는 면이 이루는 각 θ 에 따라서 변하고 θ 의 값은 팁의 종류 뿐만이 아니라 비등방성인 팁에서는 팁이 스캔하는 방향에 따라서도 변화한다. 벌코비치 팁은 $\alpha(\theta = 83.72^\circ)$ 와 $\beta(\theta = 68.34^\circ)$ 로 입사하는 경우에 따라서 변화되고, 원통형 팁의 θ 값은 76.4° 로 오차를 나타낸다.

Fig. 8은 SPM으로 측정된 패턴의 형태를 기준으로 벌코비치 팁과 원통형 팁의 오차를 계산하기 위한 계략도이고, l_0 와 l 은 각각 SPM으로 측정된 패턴의 윗변과 밑변의 길이이며 Δl 은 팁에 의해 발생하는 오차이며 h 는 패턴의 수직 두께이다. 그림에서 l_0 , l , h 의 값은 각각 0.3 μm, 0.54 μm,

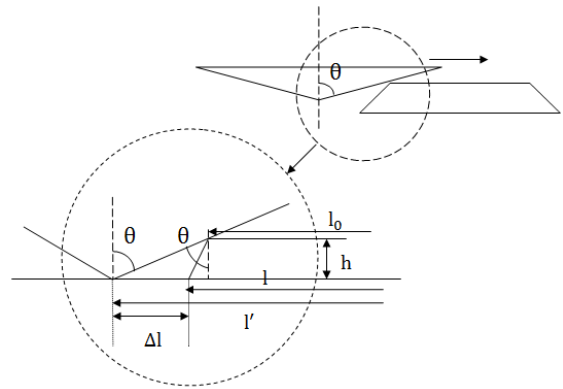


Figure 8. Calculation of theoretical error.

0.152 μm이다. 여기서 실제 값과의 오차 Δl 을 구하기 위해서 간단한 계산과정을 거치며,

$$l' = l_0 + 2h \tan \theta$$

$$2\Delta l = l' - l = 2h \tan \theta - (l - l_0)$$

$$\therefore \Delta l = h \tan \theta - \frac{1}{2}(l - l_0)$$

$$\therefore \text{error} = \frac{l' - l}{l} = \frac{\Delta l}{l} = \frac{h}{l} \tan \theta - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{l_0}{l}\right)$$

$$\text{Error} = 0.281 \tan \theta - 0.222$$

패턴에 접촉하는 선과 연직선과의 각도가 θ 일 때 생기는 이론적인 오차율은 $\tan \theta$ 에 비례하여 선형으로 증가한다. 하지만 벌코비치 팁의 경우 앞서서도 언급하였듯이 패턴과 접하는 팁의 방향에 따라 θ 값은 다양한 값을 갖는다. Table 1에서 벌코비치 팁(a)은 θ 값이 83.72° 와 (b)인 68.34° 경우이다. Table 1에 따르면 벌코비치 팁은 접하는 방향에 따

Table 1. Comparison of theoretical value with experimental value.

	Error		
	Theoretical Value (%)	Experimental Value (%)	Percent Error (%)
Berkovich tip (a)	233.1	120	94.3
Berkovich tip (b)	48.6		59.5
Conical tip	94.0	112.8	16.7

라서 큰 차이를 보인다는 것을 명확히 알 수 있다. 실험적인 오차 값과 비교하였을 때 발생하는 오차는 (b)방향으로 입사하였을 때가 (a)방향 보다 훨씬 적은 것으로 보아 실험에 사용된 벌코비치 팁은 (b)에 근접한 형태로 스캔하였을 가능성이 높다. 반면에 원통형 팁은 등방성을 가지므로 방향에 따른 오차율의 변화를 보이지 않으며 벌코비치 팁에 비하여 훨씬 높은 정밀도를 갖는다.

IV. 결 론

본 연구에서는 벌코비치 팁과 원통형 팁을 나노인텐더에 장착하여 분석할때 생기는 오차의 원인과 범위를 측정하기 위하여 석영기판 표면에 압흔을 남겨 사용된 팁의 모형을 결정하였고 각각의 팁을 사용하여 다결정 실리콘 패턴을 스캔함으로써 SPM으로 측정된 다결정 실리콘 패턴의 영상과 비교하여 팁의 모양에 따른 오차를 계산하였고 이 오차와 이론적으로 계산된 오차를 비교하였다. 실험 결과 벌코비치 팁의 기하학적 구조에 의해서 패턴을 스캔하는 방향에 따라서 발생하는 오차 값이 변화하였고 벌코비치 팁과 원통형 팁을 이용한 측정에서도 다른 값의 오차가 발생하였다. 벌코비치 팁의 경우 팁의 중심선으로부터 시료와 닿는 선까지의 각이 83.72°에서 68.34°까지 변하는 반면, 원통형 팁은 76.40°로 일정하였기 때문에 벌코비치 팁에 비해 원통형 팁은 일정한 오차 값을 가졌다. 벌코비치 팁과 원통형 팁으로 패턴의 영상을 얻은 결과 SPM의 측정결과와는 각각 20%, 12.8%차이를 얻었으며 이론적으로 계산한

각 팁의 형태에 의해 생기는 오차를 비교해 본 결과 벌코비치 팁은 $b(\theta = 68.34^\circ)$ 에 근접한 방향으로 스캔한 결과가 $a(\theta = 83.72^\circ)$ 보다 정밀하였으며 원통형 팁이 벌코비치 팁에 비해 더욱 높은 정밀도를 가졌다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부 “전략기술개발사업”으로 지원된 연구임.

참고문헌

- [1] 김수인, 이창우, 한국진공학회지 제 17권 2호, 113 (2007).
- [2] 김수인, 이창우, 한국진공학회지 제 17권 6호, 544 (2008).
- [3] Pugno N. Acta Mater 제 55권 1947 (2007).
- [4] TH Fang and WJ Chang, Physica B: Physics of Condensed Matter (2004).
- [5] HLX Ni and GKR Cheng, Journal of Materials Research (2006).
- [6] 김재현, 이학주, 한승우, 최병익, 좌성훈, 이창승, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, 60 (2005).
- [7] 김현우, 노성철, 윤덕진, 장홍준, 김수인, 이종림, 이창우, 한국진공학회지 제 18권 2호, 97 (2009).

Errors of Surface Image Due to the Different Tip of Nano-Indenter

Soo In Kim^a, Chan Mi Lee^b, and Chang Woo Lee^{a*}

^a*Department of Nano & Electronic Physics, Kookmin University, Seoul 136-702*

^b*Pungmoon girl's highschool, Seoul 110-240*

(Received August 24, 2009, Revised September 10, 2009, Accepted September 14, 2009)

Due to the decrease of line width and increase of the integration level of the device, it is expected that 'Bottom-up' method will replace currently used 'Top-down' method. Researches about 'Bottom-up' device production such as Nanowires and Nanobelts are widely held on. To utilize these technologies in devices, properties of matter should be exactly measured. Nano-indenters are used to measure the properties of nano-scale structures. Additionally, Nano-indenters provide AFM(Atomic Force Microscopy) function to get the image of the surface and get physical properties for exact position of nano-structure using this image. However, nano-indenter tips have relatively much bigger size than ordinary AFM probes, there occurs considerable error in surface image by Nano-Indenter. Accordingly, this research used 50nm Berkovich tip and lum 90° Conical tip, which are commonly used in Nano-Indenter. To find out the surface characteristics for each kind of tip, we indented the surface of thin layer by each tip and compared surface image and indentation depth. Then, we got image of 100nm-size structure by surface scanning using Nano-Indenter and compared it with surface image gained by current AFM technology. We calculated the errors between two images and compared it with theoretical error.

Keywords : Surface Image Error, Nano-indenter, Berkovich tip, Conical tip

* [E-mail] cwlee@kookmin.ac.kr