

## 길이 소급성을 갖는 AFM 을 이용한 150 nm 피치 측정

진중환\*(KAIST 원), I. Misumi(The university of Tokyo, National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology(NMIJ/AIST)), S. Gonda, T. Kurosawa(NMIJ/AIST)

### 150 nm Pitch Measurement using Metrological AFM

J.H. Jin(Mechanical Eng. Dept. KAIST), I. Misumi(The university of Tokyo, NMIJ/AIST), S. Gonda, T. Kurosawa(NMIJ/AIST)

#### ABSTRACT

Pitch measurements of 150 nm pitch one-dimensional grating standards were carried out using a contact mode atomic force microscopy(C-AFM) with a high resolution three-axis laser interferometer. It was called as 'Nano-metrological AFM'. In Nano-metrological AFM, Three laser interferometers were aligned well to the end of AFM tip. Laser sources of the three-axis laser interferometer in the nano-metrological AFM were calibrated with an I<sub>2</sub>-stabilized He-Ne laser at a wavelength of 633 nm. So, the Abbe error was minimized and the result of the pitch measurement using the nano-metrological AFM has a traceability to the length standard directly. The uncertainty in the pitch measurement was estimated in accordance with the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement(GUM). The Primary source of uncertainty in the pitch-measurements was derived from repeatability of pitch-measurement, and its value was approx 0.186 nm. Expanded uncertainty(k=2) of less than 5.23 nm was obtained. It is suggested that the metrological AFM is a useful tool for the nano-metrological standard calibration.

**Key Words** : AFM, Traceability to the length standard, Pitch Measurement

#### 1. 서론

나노 단위의 측정은 정밀 공학이 발전함에 따라 여러 분야에서 이루어지고 있으며, 또한 요구 되어지고 있다. 특히 반도체 분야에서, 국제 기술 로드맵(International Technology Raadmap)[1]의 측정(Metrology)부분의 보고에 따르면, 2003 년에 요구되어지는 측정 값들은 대략 100 ~ 150 nm 이다.

현장이나 실험실 단위에서 이러한 정밀 측정, 특히 피치 및 단차 측정을 고정밀도의 측정기를 통해서 행하기에는 환경 제어의 어려움은 물론이려니와 여러 가지 제약을 받게 된다. 이러한 나노 단위의 정밀 측정의 가장 간단한 방법 중에 하나가 표준기관에서 보정된(Calibrated) 표준 시편과의 비교이다. 따라서 이런 표준 시편들의 보정 및 평가는 필수적이며, 이런 표준 시편을 보정하는 방법들을

각 나라의 표준 기관들은 가지고 있으며[2][5], 표준 시편의 보정 및 평가에 대한 노력들이 계속 이루어지고 있다.

각 표준기관에서는 여러 가지 측정 방법을 통해 얻어진 측정 결과에 대해 표준(standard)을 가지고 객관적인 평가를 하게 된다. 길이 측정에 있어서는, 안정화된 He-Ne 레이저의 간섭을 통해 길이의 표준을 정의한다. 따라서, 우리가 측정한 값이 신뢰를 가지기 위해서는 길이의 표준에 소급하는 '길이 소급성'을 가져야 한다.

나노 단위의 피치를 갖는(본 논문에서는 사용된 시편은  $144.5 \pm 0.5$  nm 의 피치를 갖는 Grating 이다.) Grating 의 경우, 피치가 너무 작아 현재의 기계적 측정 방법이나 광학식 방법으로는 측정의 제한을 받는다. 따라서 수 nm 이하의 수평, 수직 분해능을 갖는 AFM(Atomic Force Microscopy)을 이용하여, 측

정을 행하며 동시에 그 측정 결과가 길이 소급성을 갖도록 한다.

본 실험은 일본의 표준 기관인 NMIJ(National Metrology Institute of Japan) / AIST(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)의 길이 소급성을 갖는 AFM 인 'Nano-metrological AFM'[3]을 통해 수행하였다. 실험 장치의 구성, 작동 원리 및 구조, 실험 방법에 대해 설명을 하며, 결론에서는 측정 결과 및 불확도 평가(Uncertainty Evaluation)에 대해 기술 하였다.

본 논문을 통해 '길이 소급성을 갖는 AFM'이 나노 단위의 피치 보정 및 평가에 좋은 방법 중에 하나임을 알 수 있게 되었으며, 새로운 '길이 소급성을 갖는 AFM' 구현을 위한 기초 실험이 되었다.

## 2. 실험 장치 및 실험 방법

본 실험을 수행하기 위한 길이 소급성을 갖는 AFM 의 구성은 크게 프로브(Probe) 부분, 레이저 간섭계(interferometer) 부분, 스테이지(stage) 부분으로 구성되어 있다.

프로브 부분은 Fig. 1 처럼 제일 위쪽에 위치하고 있으며, 물질간의 상호 작용 중 상대적으로 큰 척력을 이용하는 접촉 모드 AFM (Contact mode AFM)이 설치되어 있다. AFM 의 위치 정보를 얻는 방식은 광학식 레버(optical lever)를 사용하는 방식이며, 이는 레이저 다이오드(LD)에서 나오는 빛이 AFM 팁의 뒷면에 반사되어 휘어짐을 SPD (Segmented Photodiode)의 신호를 통해 AFM 팁의 위치를 알아내는 방식이다. 또, AFM 팁의 끝과 시편사이의 거리를 일정하게 유지하기 위해 PID 제어를 하게 된다.

레이저 간섭계 부분은 세 개의 안정화된 He-Ne 레이저 간섭계를 사용하며, Fig. 2 처럼 AFM 팁과 샘플(sample)과 일직선이 되도록 잘 정렬되어, 아베 오차를 최소화 시킨다. X, Y, Z 축에 수직으로 정렬되어 샘플 홀더의 옆에 구성되어진 미러(mirror)면에 반사되어 간섭 무늬를 얻게 된다. 이러한 구조로 AFM 의 측정값이 바로 길이 소급성을 가지게 된다. 현 길이 소급성을 갖는 AFM 의 측정 분해능은 0.04 nm 이다[3].

스테이지(stage) 부분은 제일 아래쪽에 X, Y 평면 운동을 할 수 있는 스테이지가 위치하며, 그 위에 Z 축 방향으로 수직 운동을 하는 튜브(tube) 타입의 PZT 가 위치한다. 스테이지의 행정이 길이 소급성을 갖는 AFM 의 전체 행정이 되며, 이는 17.5 um(X) x 17.5 um(Y) x 2.5 um(Z) 이다.

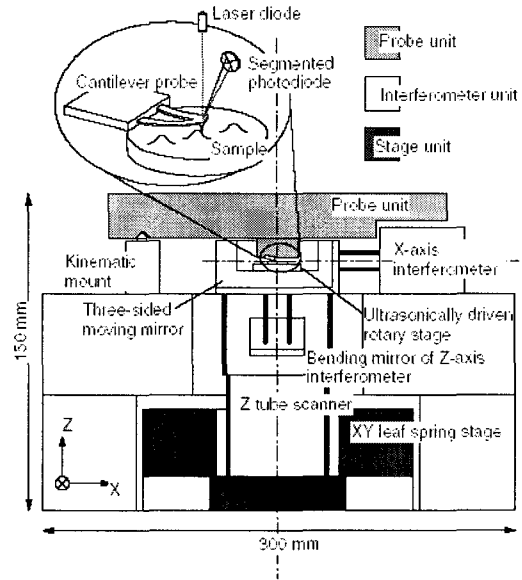


Fig. 1 Cross section of the nano-metrological AFM,[4]

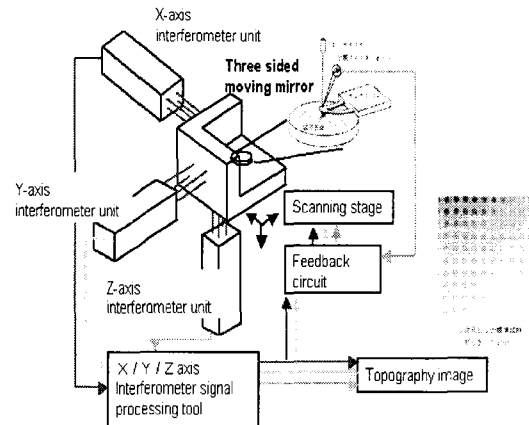
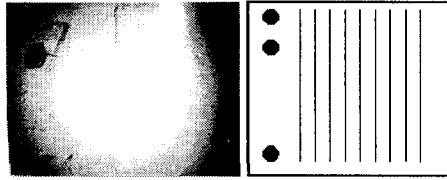


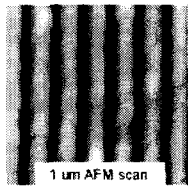
Fig. 2. Block Diagram of the nano-metrological AFM

본 실험에서는 사용한 시편은 Fig.3 과 같은 'Advanced Surface Microscopy'사에서 나온  $144.5 \pm 0.5$  nm 의 표준 시편이다. 이 시편의 전체 크기는 '길이 소급성을 갖는 AFM'의 측정 영역인  $17.5 \mu\text{m} \times 17.5 \mu\text{m}$  보다 훨씬 넓기 때문에, 시편 전체를 한번에 측정할 수가 없다.

따라서, Fig.4 (a)와 같이  $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$  정도의 측정 영역 네 곳을 임의로 선정하였다. 네 곳을 측정함으로써 균일도(uniformity)를 알아 보았고, 네 영역 중 한 영역(측정 영역 1 번)은 반복성(repeatability)을 알아보기 위해 3 번 연속 측정하였다.

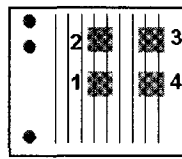


(a) Sample (pitch 144.5 nm)

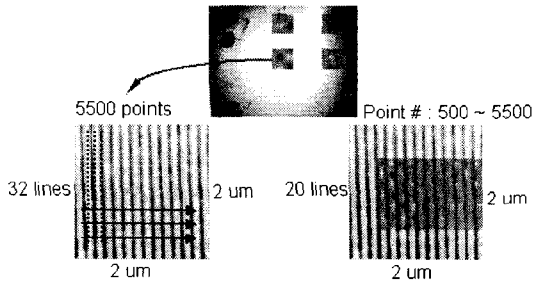


(b) AFM Image of the sample (1  $\mu\text{m}$  x 1  $\mu\text{m}$ )

Fig. 3 150 nm pitch sample ('Advanced Surface Microscopy')



(a) Measurement points



(b) Measurement data

Fig. 4 Measurement points and data

측정 영역에서의 스캔(scan)은 Fig. 4(b)와 같이 2  $\mu\text{m}$  x 2  $\mu\text{m}$  영역 내에서 32 줄(line)을 측정하였고, 각 줄마다 5500 개의 데이터들을 얻었다. 그리고, 처음과 끝 부분의 데이터들은 버리고, 가운데 20 개의 줄에서 500 ~ 5500 번째까지의 5000 개의 데이터만 (Fig. 4(b)에서의 붉은색 부분)을 측정 데이터로써 취했다.

이렇게 얻어진 데이터는 Fig. 5 와 같은 방법으로 분석을 하게 되는데[4], 우선 압력, 습도, 온도 등의 환경을 고려하여 측정 값을 보정한다. 그 값에서 기울기 성분(slope angle)을 제거하여, 각각의 피

크(peak)를 구하게 된다. 이를 구하는 방법은 여러 가지가 있을 수 있으나 본 논문에서는 도심을 찾는 방법으로 도심의 위치를 피크의 위치로 두었다. 그 후에 평면 방향에서의 기울기 성분을 제거하여, 각 줄에서의 평균 피크를 구하며, 이를 통해 측정영역에서의 평균 피치를 구하였다.

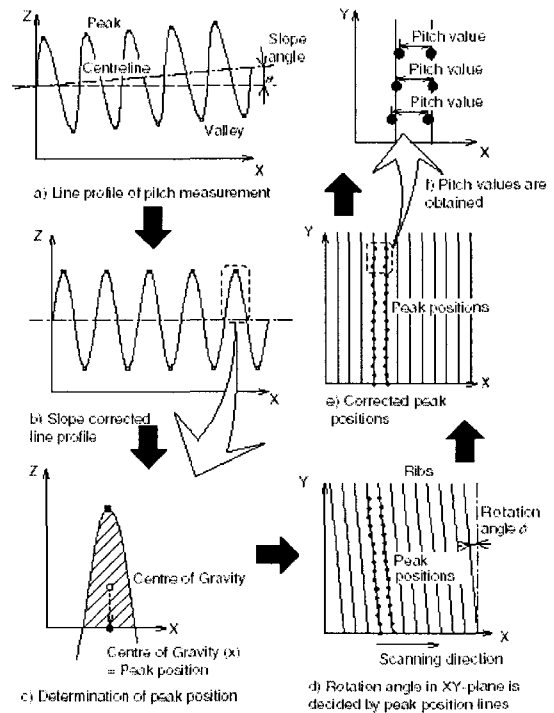


Fig. 5 Measurement Procedure, [4]

### 3. 실험 결과 및 불확도 평가

본 실험에서 얻어진 피치 측정의 결과는 Table.1 과 같다. 측정 영역 1 에서는 3 번을 측정하였고, 나머지는 각각 1 번씩 측정하여, 그 값을 얻었다. 평균 피치는 146.65 nm 이며, 각 피치들의 표준 편차 (standard deviation)는 4.67 nm 이다.

불확도를 평가하기 위한 평가 요소는 Table. 2 처럼 주어진다. 불확도 요소를 보면, 우선 피치 측정에서 생길 수 있는 불확도 요소가 있다[4]. 이는 시편 크기가 측정 영역보다 크기 때문에 전체를 측정할 수 없으며, 이에 따라 생길 수 있는 시편의 균일성(uniformity)이 고려되어야 하며, 시스템의 반복성(repeatability)이 고려되어야 한다. 레이저 간섭계에서 고려해야 할 요소는 레이저 자체의 안정도 및 환경의 변화, 광 축 정렬에 따라 생길 수 있

는 요소들로 나뉘어져 있다. 그리고 공기 굴절률의 환경에 따른 변화들과 시편의 온도에 따른 열적 변형에 대해 고려해야 하며, 마지막으로 시편 자체의 수평, 수직 방향의 기울기 성분을 고려해야 한다.

Table 1. Result of Pitch Measurement

| Measurement Point # | Pitch (nm) | S.D (nm) |
|---------------------|------------|----------|
| 1                   | 1          | 144.80   |
|                     | 2          | 144.56   |
|                     | 3          | 144.43   |
| 2                   | 144.76     | 4.63     |
| 3                   | 144.60     | 5.42     |
| 4                   | 144.73     | 4.72     |
| Average Value (nm)  | 146.65     | 4.67     |

Table 2. Sources and values of uncertainty.[4]

| Sources of Uncertainty                            | Value of Uncertainty (nm) |
|---|---------------------------|
| (1) Pitch Measurement                             |                           |
| (i) Repeatability                                 | 1.86E-01                  |
| (ii) Nonuniformity                                | 1.41E-01                  |
| (2) Laser Interferometer                          |                           |
| (i) Frequency variation of laser                  | 1.21E-02                  |
| (ii) Frequency stability of laser                 | 6.59E-06                  |
| (iii) Changes in the dead path (Temperature)      | 1.17E-06                  |
| (iv) Changes in the dead path (Thermal Expansion) | 1.17E-06                  |
| (v) Interferometer resolution                     | 2.23E-02                  |
| (vi) Cosine error in optical alignment            | 1.02E-05                  |
| (vii) Abbe error                                  | 1.09E-02                  |
| (viii) Change in optical path                     | 2.06E-03                  |
| (ix) Interferometer nonlinearity (Cyclic Error)   | 1.15E-01                  |
| (3) Refractive index of air                       |                           |
| (i) Refractive index of air (Temperature)         | 9.48E-05                  |
| (ii) Refractive index of air (Humidity)           | 3.12E-06                  |
| (iii) Refractive index of air (Pressure)          | 3.34E-04                  |
| (4) Sample temperature                            |                           |
| (i) Difference in the sample temperature          | 6.94E-04                  |
| (ii) Thermal expansion                            | 6.95E-04                  |
| (5) Slope correction                              |                           |
| (i) Cosine error (vertical inclination)           | 6.98E-04                  |
| (ii) Cosine error (lateral inclination)           | 6.86E-04                  |

Table.2 에서 주어지는 불확도 평가에서 (2) 레이저 간섭계, (3) 공기 굴절률, (4) 샘플의 온도 영향 등은 각기 오랜 기간동안 실험실 환경에서 측정된 데이터를 바탕으로 구해진 값이므로, 본 논문에서는 먼저 선행연구를 바탕으로 구해진 값이다[4]. 그리고, 나머지 피치 측정에서의 시편의 균일성과 측정 반복성, 그리고 시편의 기울기에 해당하는 부분은 직접 실험에서 얻은 결과로부터 구해진 값이다.

이 값을 바탕으로 해서 구해진 확장 불확도 (Expanded uncertainty, k=2)는 0.52 nm 이다. 이 값은 피치 평균치인 144.65 nm 의 약 0.18%에 해당하는 값이며, 시편 제작 회사에서 제공하는 피치 값인 144.5 ± 0.5 nm 와도 유사함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문을 통해 ‘길이 소급성을 갖는 AFM’이 나노 단위의 피치 보정 및 평가에 좋은 방법 중에 하나임을 알 수 있게 되었으며, 새로운 ‘길이 소급성을 갖는 AFM’ 구현을 위한 기초 실험이 되었다.

‘길이 소급성을 갖는 AFM’은 접촉 모드 (Contact mode) AFM 과 세 개의 안정화된 I<sub>2</sub> 의 He-Ne 레이저 간섭계로 이루어져 있다. 여기서 얻어진 측정 결과는 길이 소급성을 가지게 되며, 그 측정 결과를 바탕으로 불확도 평가를 수행하였다.

불확도 평가에서는 측정의 반복성, 시편의 균일성, 레이저 간섭계의 비선형성(Cyclic error) 등이 큰 값으로 작용했다.

시편은 피치 값은 144.5 ± 0.5 nm 이며, 본 실험에 사용된 ‘길이 소급성을 갖는 AFM’에 의한 측정 결과는 평균 피치가 146.65 nm 이며, 확장 불확도 (k=2)는 0.52 nm 이다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 및 NMIJ/AIST 의 협력하에 일본이공계교류센터(Japan International Science & Technology Exchange Center, JISTEC)의 주최하에 이루어진 2003 년 1 월 ~ 2 월에 진행된 Winter Institute 의 연구 성과입니다.

#### 참고문헌

1. Semiconductor Industry Association, The National Technology Roadmap for Semiconductors, 1999
2. NMIJ/AIST Homepage (<http://www.aist.go.jp>)
3. S.Gonda, T. Doi, T. Kurosawa, Y. Tanimura, N. Hisata, T.Yamahishi, H.Fujimoto, and H.Yukawa, "Real-time, interferometrically measuring atomic force microscope for direct calibration of standards, Review of Scientific instruments, 70(8), pp 3362, 1999
4. I. Misumi, S. Gonda, T. Kurosawa, K. Takamasu, "Uncertainty in pitch measurements of one dimensional grating standards using an nanometrological atomic force microscope", Measurement Science and Technology, 14, 2003
5. PTB Homepage (<http://www.ptb.de/en/>)