

# 비초점 정밀 계측 방식에 의한 새로운 광학 프로브를 이용한 반도체 웨이퍼의 삼차원 미소형상 측정 기술

박희재\*, 안우정\*\*

## A New Method of Noncontact Measurement for 3D Microtopography in Semiconductor Wafer Implementing a New Optical Probe based on the Precision Defocus Measurement

Heui Jae Pahk\*, Woo Jung Ahn\*\*

### ABSTRACT

In this paper, a new method of noncontact measurement has been developed for a 3 dimensional topography in semiconductor wafer, implementing a new optical probe based on the precision defocus measurement. The developed technique consists of the new optical probe, precision stages, and the measurement/control system. The basic principle of the technique is to use the reflected slit beam from the specimen surface, and to measure the deviation of the specimen surface. The defocusing distance can be measured by the reflected slit beam, where the defocused image is measured by the proposed optical probe, giving very high resolution. The distance measuring formula has been proposed for the developed probe, using the laws of geometric optics. The precision calibration technique has been applied, giving about 10 nanometer resolution and 72 nanometer of four sigma uncertainty. In order to quantize the micro pattern in the specimen surface, some efficient analysis algorithms have been developed to analyse the 3D topography pattern and some parameters of the surface. The developed system has been successfully applied to measure the wafer surface, demonstrating the line scanning feature and excellent 3 dimensional measurement capability.

**Key Words** : Surface Measurement (표면 측정), Noncontact Method (비접촉 측정), Defocus Measure (비초점 계측), Optical Probe (광학 프로브), Rectangular slit(직사각형 슬릿), Wafer Surface (웨이퍼 표면)

### 1. 서론

최근에 미소표면에 대한 삼차원 형상의 측정의 수요가 많은 과학 및 공학 분야에서 꾸준히 증가하고 있으며, 측정바늘을 이용하는

방법(Stylus Based Method), 광학 초점을 이용하는 방법(Focus Based Method), 간섭상을 이용하는 방법, 전자 현미경법(SEM : Scanning Electronic Microscope), 스캐닝 프로브 현미경법(SPM : Scanning Probe Microscope) 등의 방법들이 일반적으로

\* 서울대학교 공과대학 기계공학부

\*\* 서울대학교 대학원 기계설계학과

사용되어지고 있다<sup>[6-8]</sup>. Fig.1 에는 현재 광범위하게 사용되고 있는 3 차원 미소형상 측정기술의 수평 및 수직 측정 범위를 보이고 있다<sup>[1]</sup>. 측정바늘을 이용하는 방법은 일반적으로 수 밀리미터까지의 높이 측정 범위와 나노미터 오더의 높이 측정 분해능을 가지고 있어서 마이크로 미터 또는 서브 마이크로 미터 오더의 공학 표면등을 측정하는데에 적절하다. 초점을 이용하는 방법에는 공초점 현미경(confocal microscope)과 같이 광원과 반사광의 수광면이 동일한 초점을 가지면서 높이를 측정하는 방법과 초점에서 떨어진 정도를 비초점 계측방식에 의하여 높이를 측정하는 방법으로 크게 나눌 수 있다.

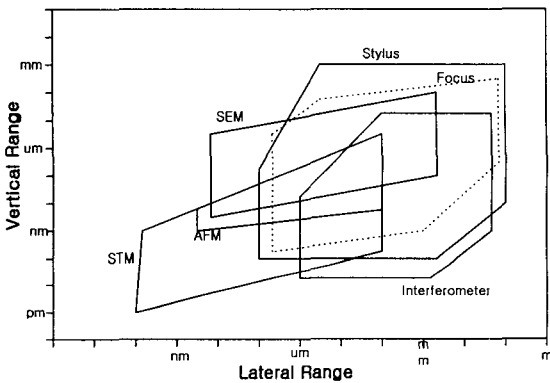


Fig. 1 Spectrum of 3D Surface Measurement Technique

일반적으로 초점을 이용한 방법은 약 0.1 마이크로미터 정도의 수직 및 수평 분해능을 가지고 있으며 높이 방향의 측정범위는 수백 마이크로미터에 이른다. 간섭상을 이용하는 방법은 높이 측정 분해능에서는 일반적으로 서브나노미터 오더까지 가능한 반면 높이 측정영역은 사용하는 광원의 파장에 제한을 받는다. 전자현미경을 이용한 방법<sup>[2,3]</sup>은 전자빔을 시료표면에 주사하고, 시료표면에서 검출된 전류신호를 표면위치에 따라서 검출하여 형상을 측정하는 방법으로서 3 차원 이미지를 구현하기 위해 두개의 전자현미경으로 구성되는 스테레오 페어 방법 (stereo pair technique)에 의해서 표면의 3 차원 형상을 구현하는 방법과 표면의 경사도에 비례하여 측정되는 배면 산란 전자신호(back scattered electron signal)를 직접적분해 의해서

3 차원 형상을 측정하는 방법(Direct Integration Method) 이 있다. 현재 전자 현미경에 의한 수평방향의 분해능은 약 수 나노미터 오더이며, 수직방향의 분해능은 수십 나노미터 오더에서 수 나노미터 정도에 이른다. 그러나 전자 현미경으로 표면을 측정하는 경우에는 진공환경 구축, 시료준비등에 많은 시간이 소요되며, 비전도체 시료는 측정전에 코팅등을 수행해야 한다는 점등이 단점으로 지적되어 왔다.

따라서 본 논문에서는 반도체 웨이퍼의 식각높이등을 측정하는데 있어서 시료의 절단이나 진공환경의 구축없이 일종의 비초점 계측방식에 의하여 미소 3 차원 표면을 계측하는 방법으로서 새로운 광학 프로브와 정밀이송 스테이지, 측정시스템 제어기 등으로 구성되는 새로운 비접촉 측정방법을 제안하였다. 제안된 새로운 비접촉 측정 방법은 직사각형의 슬릿으로 구성된 광학창을 통과하는 슬릿광으로서 표면을 조사하고 이의 반사광을 계측하여 비초점 방식에 의한 높이 측정을 수행하는 기술로서 관련된 광학식등을 새롭게 제안하였으며, 조명, 광학렌즈, 분광기, CCD 카메라등으로 구성되는 광학 시스템을 구현하였다. 미소 표면의 효율적인 측정을 위해서 정밀 이송스테이지와 이송제어 장치를 구현하였으며, 측정을 수행할 수 있는 관련 해석 소프트웨어도 개발하여 미소 형상의 3 차원 형상의 표면 파라미터 등을 측정할 수 있는 효율적인 해석 알고리즘을 개발하였다. 정밀한 높이 측정을 위해서 레이저 측정기를 이용하여 측정성능을 평가한 결과 10 나노미터 오더의 분해능과 72 나노미터의 불확도(4σ Uncertainty)를 가지는 것으로 평가되었다. 개발된 시스템은 웨이퍼 표면을 측정하는데 적용되어 매우 좋은 성능을 보여주고 있다.

## 2. 높이 측정을 위한 광학 프로브 - 설계와 기본원리

앞 절에서 설명한 바와 같이 비초점 계측 방식에 의한 새로운 광학 프로브를 설계하였으며, 개발된 방법의 핵심을 이루는 광학 프로브의 개략도가 Fig.2 에 나타나 있다. 할로겐 램프의 백색 광원에서 출발한 빛은 볼록렌즈와 직사각형의 슬릿 형상으로 구성된 광학창(optical

window)을 통과하여, 광학 프로브 시스템으로 들어오게 된다. 광학창을 통과한 빛은 표면 측정을 위한 높은 광도의 슬릿광(slit beam)으로 되어, 슬릿광은 반거울(half mirror)에 반사되고, 확대를 위한 대물렌즈를 통과하여, 측정물에 도달하게 된다. 측정물로부터 반사된 광은 대물렌즈, 반거울을 지나 최종적으로 반거울 뒤에 위치한 CCD 평면에 도달하게 된다.

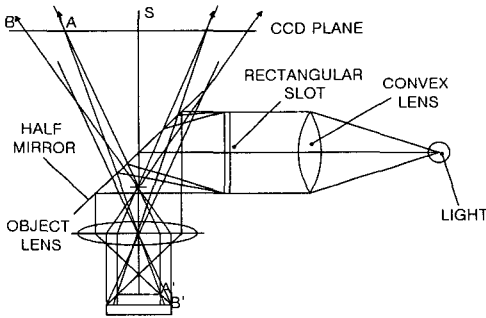


Fig. 2 Diagram of the New Optical Probe

Fig.2에서 볼 수 있듯이, 직사각형의 슬릿 구조로 되어 있는 광학창은 측정 대상물의 측정을 위한 슬릿광을 만들어 내는 중요한 역할을 한다.

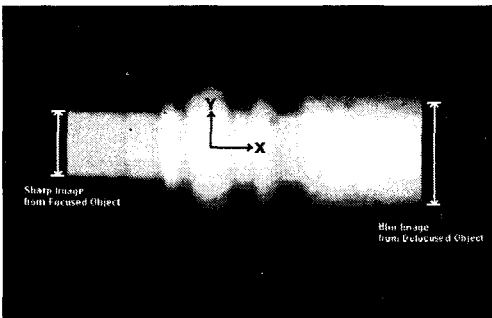


Fig. 3 Typical Image of Wafer Surface Having Different Height Viewed from the Optical Probe

Fig.3은 CCD 촬상면에 맺힌, 서로 다른 높이를 가지는 웨이퍼 표면으로부터 반사된 영상을 나타내고 있다. 번짐이 없는 깨끗한 영상과 번짐이 있는 영상이 동시에 나타나게 되는데, 왼쪽 부분이 초점이 맞은 부분으로부터 반사된 깨끗한 영상(Sharp Image)이며, 오른쪽

부분이 초점이 맞지 않은 부분으로부터 반사된 번짐이 있는 영상(Blur Image)이다. 그리고, 이때 깨끗한 영상의 크기와 번짐이 있는 영상의 크기의 비율이 대상물의 높이에 따라 변하는 것이 관측되는데, 이에 대한 상세한 설명은 다음과 같다.

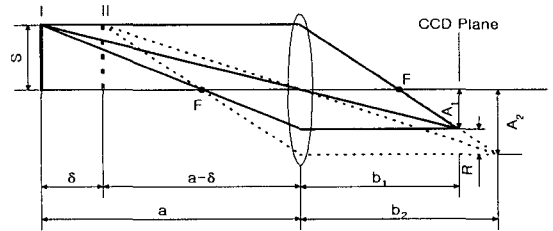


Fig. 4 Basic Measurement Principle of the Developed Optical Probe

Fig.4에 높이 측정을 위해 개발된 광학 프로브의 기본 이론을 나타내었다. 측정 대상물 I,II가  $\delta$ 만큼의 높이 차이를 가진다고 하면, 측정대상물 I,II의 영상 이미지는 광학계를 통해 렌즈로부터 각각  $b_1, b_2$ 만큼 떨어져 있는 각각의 초점 평면에 크기  $A_1, A_2$ 를 가지는 영상으로 투영되게 된다. 영상 이미지를 측정하는 촬상면(CCD 평면)을 측정 대상물 I의 초점 평면( $b_1$ )에 위치시키면, 영상 이미지  $A_1$ 은 번짐이 없는 깨끗한 영상으로, 영상 이미지  $A_2$ 는 번짐이 있는 영상으로 투영되게 된다. 본 논문에서는, 투영된 영상이미지의 크기를 계측함으로써 높이 측정을 수행하였다.

기하광학의 법칙에 따라, 측정 대상물 I,II와 영상이미지  $A_1, A_2$ 에 대해 다음과 같은 수식을 만들 수 있다.  $a$ 를 렌즈 중심으로부터 측정물 I까지의 거리,  $\delta$ 를 측정물 I,II 사이의 높이 차이,  $f$ 를 렌즈의 초점 거리라고 하면,

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b_1} = \frac{1}{f} \quad (\text{Object I}) \quad (1)$$

$$\frac{1}{a - \delta} + \frac{1}{b_2} = \frac{1}{f} \quad (\text{Object II}) \quad (2)$$

여기서,  $b_1, b_2$ 는 렌즈 중심으로부터 측정물 I,II의 초점 평면까지의 거리이다.

Fig.4 에서 삼각형의 짧은쪽의 정리에 의해, 다음의 수식을 만들어 낼 수 있다.

즉, S 를 측정대상물의 폭이라고 하면,

$$a : b_1 = S : A_1 \quad (3)$$

$$a - \delta : b_2 = S : A_2 \quad (4)$$

따라서 식(3)과 식(4)에 의해, 높이 차이( $\delta$ )와 CCD 평면에서 계측된 번짐이 있는 영상의 크기(R)와의 관계식을 구할 수 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta = a - \frac{ab_2}{b_1 \frac{A_2}{A_1}} = a - \frac{ab_2 A_1}{b_1 (A_1 + R)} \quad (5)$$

그러므로, 적절한 보정방법을 통해, 식(5)의 계수들을 구하고, 깨끗한 영상과 번짐이 있는 영상의 크기를 측정하여, 식(5)에 의해서 높이 차이( $\delta$ )를 계산할 수 있다.

식(5)에 의해서 표면의 높이  $\delta$  를 정확하게 측정하기 위해서는 번짐 영상 크기(Blur Image Size)를 정밀하게 계측하는 것이 필요하다. 번짐영상의 크기는 다음과 같은 방법에 의해서 구한다. Fig.3 에서 영상이미지의 가로방향을 X 축, 세로방향을 Y 축으로 정의하고, Y 축을 따라서의 각 픽셀의 이미지의 밝기(grey level)를 I 라고 하면, 고정된 X 좌표에서 Y 축을 따라서의 번짐영상의 이미지 밝기,  $I_i$ 는 다음과 같은 선형식으로 모델링할 수 있다. 즉,

$$I = AY + B \quad \text{for fixed X} \quad (6)$$

영상카메라를 통해서 입력된 Y 축을 따라서의 i 번째 픽셀  $Y_i$ 에서의 이미지 밝기 데이터를  $I_i$  ( $i$ 는 픽셀의 개수)라고 하면, 식 (6)의 계수 A, B 는 최소자승 방법에 의해서 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$A = \frac{N \sum I_i Y_i - \sum Y_i \sum I_i}{N \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2} \quad (7)$$

$$B = \frac{N \sum Y_i^2 \sum I_i - \sum I_i Y_i \sum Y_i}{N \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2} \quad (8)$$

여기서 N 은 Y 축 방향의 픽셀의 총 개수를 의미하며, S 는 첫번째부터 N 번째까지의 픽셀을 따라서의 합을 의미한다. 그러므로 식(6)의 선형식과 영상이미지의 밝기가 매우 낮은 주변의 영상이미지( $I_0$ )가 만나는 점을 계산하면 번짐 영상이미지의 크기가 산출된다. 즉, 영상이미지의 크기  $Y_0$  는

$$Y_0 = \frac{I_0 - B}{A} \quad (9)$$

가 된다. Fig.5 는 Y 축 방향으로 한 개의 측정선을 따라서 입력된 영상이미지와 식(7),(8)에 의해서 구해진 최소자승직선을 보이고 있으며, Fig.5 의 세로축은 정규화된 밝기 (normalized grey level) 을 나타낸다.

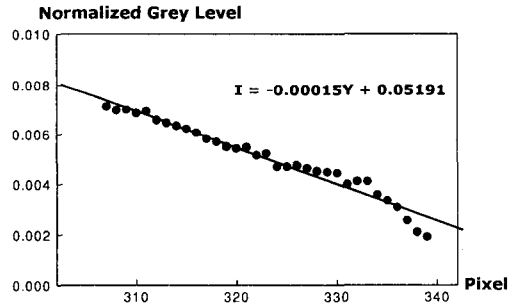


Fig. 5 Least Squares Fit for the Blur Image Measurement

### 3. 광학 프로브의 보정

개발된 광학 프로브의 높이 측정 성능을 평가하고, 높이 데이터를 정확히 측정하기 위해서는 정밀한 보정방법을 통해서 식(5)의 계수들을 구해야 한다. 식(5)는 다음의 식(10)과 같은 보다 간단한 식으로 나타낼 수 있다.

$$\delta = C_1 - \frac{C_2}{k} \quad (10)$$

여기서,  $C_1$  은 a,  $C_2$ 는  $ab_2/b_1$ , k 는 상의 크기의

비율( $A_2/A_1$ ) 을 의미하며,  $C_1, C_2$ 는 광학프로브의 보정에 의해서 결정되어야 하는 계수이다.

광학 프로브의 보정을 위해서는 정밀하게 측정된 높이-영상크기 비율 ( $\delta_i, k_i$ )의 측정 데이터가 필요하며, 이 데이터의 측정은 Fig.6 에서 나타낸 것과 같이 정밀도가 공인된 상용 레이저 인터페로미터(Traceable Laser Interferometer)에 의해 수행되었다.

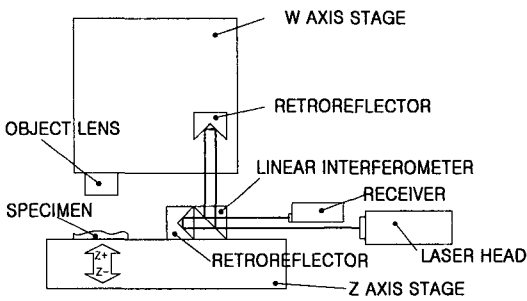


Fig. 6 Calibration Measurement using the Laser Interferometer

즉, 레이저 측정기의 인터페로미터 옵틱스를 측정물이 올라가 있는 상하로 이동할수 있는 시료테이블에 고정하고, 반사경(리플렉터)을 광학 프로브가 부착된 경통에 부착하여, 상하로 이동되는 측정물과 광학 프로브 사이의 거리를 체이저 수광부에서 계측되는 간섭현상을 통해서 측정한다. 측정물은 PC로 제어되는 마이크로 스테핑 모터에 의해 구동되는 정밀 Z축 스테이지에 의해서 위, 아래로 움직이게 된다. 보정의 구체적인 절차는 광학프로브 바로 밑에 가공된 웨이퍼시편을 놓고 행하였다. Z축 스테이지가 위아래로 움직임에 따라, 영상의 크기가 변하게 되며, 이 영상의 크기는 CCD 카메라에 의해 측정된다. 한편, Z축 스테이지의 상하 이동량은 위에서 언급한 레이저 인터페로미터에 의해 측정된다. 따라서, 보정에 필요한 높이-영상크기 데이터를 구하게 되며, 측정된 데이터 ( $\delta_i, k_i$ )에 대해 식(10)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\delta_i = C_1 - \frac{C_2}{k_i} \quad (11)$$

즉,

$$k_i \delta_i = C_1 k_i - C_2 \quad (12)$$

이 되고, 측정된 데이터를 이 식에 적용하여  $C_1, C_2$ 를 다음과 같이 결정하게 된다.

N 개의 측정 데이터 ( $\delta_i, k_i$ )에 대해, 오차의 제곱의 합, E는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = \sum_{i=1}^N (k_i \delta_i - C_1 k_i + C_2)^2 \quad (13)$$

식(13)은 변분 원리에 의해 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial E}{\partial C_1} = 2 \sum_{i=1}^N (k_i \delta_i - C_1 k_i + C_2)(-k_i) = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial E}{\partial C_2} = 2 \sum_{i=1}^N (k_i \delta_i - C_1 k_i + C_2)(1) = 0 \quad (15)$$

따라서, 식(14), 식(15)로부터, 계수  $C_1, C_2$  는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C_1 = \frac{\begin{vmatrix} \sum k_i^2 \delta_i & -\sum k_i \\ -\sum k_i \delta_i & N \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum k_i^2 & -\sum k_i \\ -\sum k_i & N \end{vmatrix}} = \frac{N \sum k_i^2 \delta_i - \sum k_i \sum k_i \delta_i}{N \sum k_i^2 - (\sum k_i)^2} \quad (16)$$

$$C_2 = \frac{\begin{vmatrix} \sum k_i^2 & \sum k_i^2 \delta_i \\ -\sum k_i & -\sum k_i \delta_i \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \sum k_i^2 & -\sum k_i \\ -\sum k_i & N \end{vmatrix}} = \frac{-\sum k_i \delta_i \sum k_i^2 + \sum k_i^2 \delta_i \sum k_i}{N \sum k_i^2 - (\sum k_i)^2} \quad (17)$$

여기서  $\sum$  는  $\sum_{i=1}^N$  을 나타낸다.

광학프로브의 정밀한 보정절차를 거쳐서 광학프로브를 이용한 높이 측정 데이터가 구해졌으며, Fig.7 은 개발된 광학 프로브 시스템에 대한 실제 보정 결과를 나타내고 있다.

Fig.7 에서 Y 축은 높이 데이터를 mm 단위로 나타낸 것이고, X 축은 상의 크기와 관계된 변수인 를 나타낸다. Fig.7 에서 보는 바와 같이 개발된

광학 프로브 시스템의 높이와 상의 크기의 관계는 식(16), (17)에 의해서 최소자승방법에 따라 다음과 같이 계산되었다.

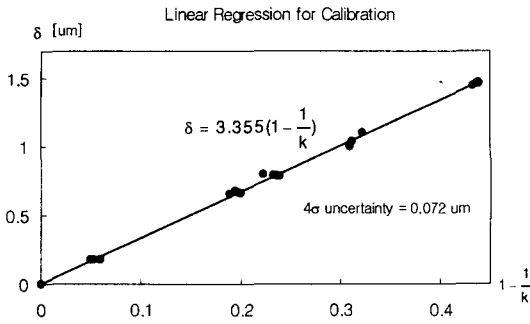


Fig. 7 Calibration Result using the Least Squares Technique

$$\delta = 3.355(1 - \frac{1}{k}) \quad (18)$$

Fig.7 에서, 점들은 실제 보정에 사용된 측정점들을 나타내며, 직선은 보정을 통해 계산된 칼리브레이션 직선을 나타낸다. 한편 위의 보정식의 불확도를 추정하기 위해서, 보정곡선으로부터의 실제 측정데이터의 표준편차(s)는 0.018um 으로 계산되었고, 95%의 신뢰도에서 높이 측정의 불확도(uncertainty, 4σ)는 0.072um 으로 평가되어, 측정의 신뢰도는 양호하였다.

한편 식(18)로부터 측정 시스템의 이론적인 측정 분해능을 다음과 같이 계산할수 있다.

식(18)의 미분을 통해서 높이의 변분(variation), dδ를 유도하면,

$$d\delta = 3.355(\frac{dK}{K^2}) \quad (19)$$

여기서 식(19)은 높이 변분 dδ와 영상크기 비율의 변분 dK 와의 관계를 결정하는 식으로서, 실제적인 웨이퍼 측정을 통해서 구한 영상값 등을 입력하면, Fig.5로부터 초점영상 크기(A<sub>1</sub>=305), 번짐영상 크기 (A<sub>2</sub>=340), 영상비율변분(dK=1/305) 데이터로부터 높이 변분, 즉, 높이 분해능은 8.8나노미터가 되며, 전체 측정영역에서 평균적으로 볼 때 약 10나노미터의 분해능을

가지는 것으로 사료된다.

#### 4. 측정 시스템 구성 및 표면 파라미터 결정

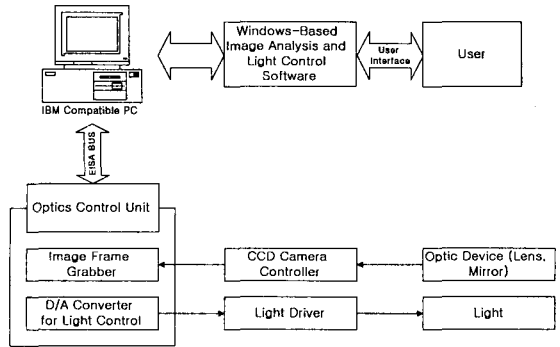


Fig. 8a Block Diagram of Optics and Illumination

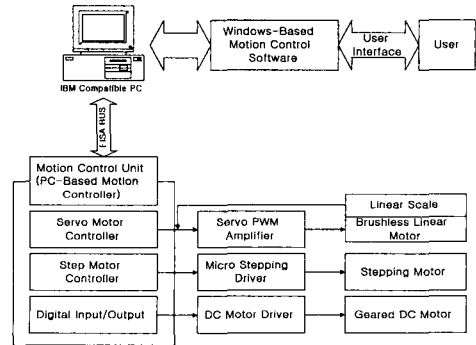


Fig. 8b Block Diagram of Mechanical Motion Control

개발된 비접촉 측정 시스템은 시스템적으로 크게, 광학 프로브 부분, 이송 스테이지 부분, 측정 소프트웨어 부분으로 이루어져 있다. 높이 측정을 위한 광학계와 조명계, 영상 입력 기능등의 광학프로브 시스템의 블록 선도가 Fig.8a 에 나타나 있다. 영상 입력 장치와 조명 제어 위한 디지털/아날로그(D/A) 변환기가 광학 제어 유닛을 구성하고 있으며, 영상 입력 장치는 CCD 카메라로부터의 신호를 획득하기 위해 렌즈, 거울, CCD 카메라 제어부 등으로 구성되었다. 정밀측정에 있어 중요한 요소인 조명의 제어를 위해 일정한 빛의 강도를 유지하기 위한 조명 제어 유닛을 설치하였으며, 이는 D/A 변환기를 통해서 구현되었다. 또한 사용자 편의성을 위해서 모든 영상 처리와 조명 제어 시스템은

윈도우즈(Windows)를 기반으로 하여 개발된 영상 해석 및 조명 제어 소프트웨어 하에서 구현하였다.

이송 스테이지 부분은 넓은 영역의 측정 대상물을 스캐닝에 의해서 측정하기 위한 것으로서, XY 평면 상에서 측정하고자 하는 부분의 위치 탐색을 위해 정밀급 XY 스테이지를 설계, 제작하였다. 마찰을 줄이고 부드러운 이송을 하기 위해 공기 베어링을 사용하였으며, 측정 오차를 최소한으로 하기 위하여 비접촉의 구동을 위한 선형 모터를 이송계로 사용하였다. 정밀 위치 결정을 위해서 0.1mm의 분해능을 가지는 광학식 선형 스케일을 사용하여 위치 제어 루프를 구현하고, 변형과 마모가 적도록 석정반(granite)을 이송 기준면으로 사용하였다. 또한, 측정물의 수직방향으로의 이송, 광학계의 수직방향으로의 피소조정, 그리고 측정물의 회전을 위해 Z-W-θ 스테이지가 구현되었다. Z-W-θ 스테이지에서, Z축 이송은 측정 대상물을 수직방향으로 이송하기 위한 것이며, W축 이송은 광학 프로브를 수직방향으로 이송하기 위해서, 그리고 θ 스테이지는 측정 대상물의 회전을 위해 설계, 제작되었다. 수직방향과 회전방향의 이송을 위해 마이크로 스테핑 모터와 직류(DC) 모터를 사용하였으며, Fig.8b에 선형 모터와 스테핑 모터, 직류 모터, 제어기로 구현된 이송 제어시스템의 블록선도를 나타내었다. XY 스테이지의 이송을 위해 선형 스케일을 장착한 브러시가 없는 선형 모터(Brushless linear motor)를 장착하였고, 선형 모터의 제어부는 펄스폭 변조(PWM : Pulse Width Modulation) 방식을 사용하는 서보 모터 드라이버를 통해서 구현하였다. Z축과 θ축은 마이크로 스테핑 모터를 구동원으로 구현하고, 마이크로 스테핑 모터 드라이버를 통해서 구현되었다. 광학계를 조절하는 W축은 DC모터를 통해 설계, 제작되며, 이는 DC 모터 드라이버와 디지털 입출력 보드를 통해서 제어된다. 전체적인 이송운동 제어는 PC 탑재형 컨트롤러를 통해서 구현되었으며, 사용자 편의성을 위해서 윈도우즈를 기반으로 하는 통합 제어 소프트웨어가 구현되었다. 따라서, 메뉴 방식으로 구현되는 소프트웨어에 의해 측정 대상물의 측정 영역을 선택하여 이송하는 것이 가능하게 되었다.

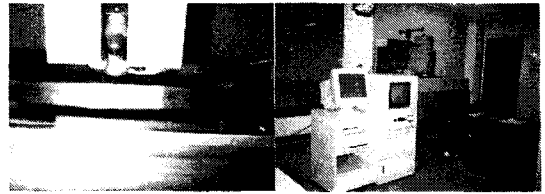


Fig. 9a Non-Contact Measurement System Developed

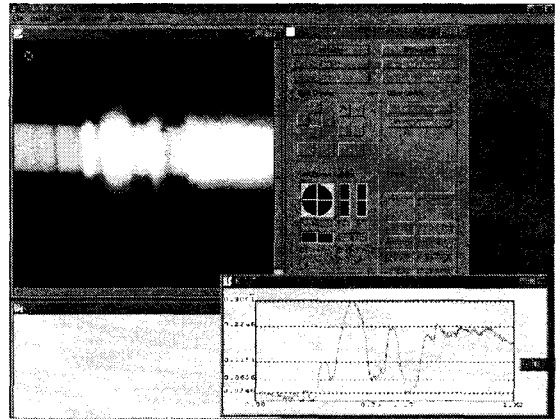


Fig. 9b Measurement System Window and Typical Measurement Result

Fig.9a의 왼쪽 그림은 프로브의 광학계 부분을 상세히 보여주고 있으며, 오른쪽 그림은 측정기 본체, 모니터, 컨트롤러 등의 측정 시스템 전체를 보여주고 있다. Fig.9b에는 개발된 비접촉 측정 시스템의 측정 시스템 윈도우와 다양한 측정 제어판, 그리고 웨이퍼 표면의 측정 예를 보이고 있다. Fig.9b에서 측정 윈도우의 왼쪽 상단에는 높낮이 프로파일을 가지는 웨이퍼의 한 단면을, 개발된 비접촉 측정 시스템의 영상부를 통해서 받은 측정 영상으로서, 선명한 이미지(sharp image)와 번짐 이미지(blur image)가 함께 나타나 있다. 영상 입력 데이터를 바탕으로 앞 절에서 언급한 측정원리를 이용하여 계산된 높이 프로파일 데이터가 우측 하단에 있으며, 최고 높이는 중간 부분에서 0.30mm로 측정되었다.

본 논문에서 제안한 비접촉 측정시스템에서는 평면도, 표면 거칠기와 같은 표면 파라미터를 구하는 시스템을 구현하였으며, 각 파라미터를 계산하는 알고리즘은 다음과 같다.

$(x_i, y_i)$ 를 측정된 표면의  $(x, y)$  좌표계라 하고,  $Z_{ij}$ 를  $(x_i, y_j)$  위치에서의 측정된 높이라 하면,

평면도는 최소자승평면등으로 정의되는 기준평면을 구한후, 기준평면으로부터의 최고점과 최소점의 높이 차이로 계산된다. 즉, 표면형상의 평면도(flatness)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Flatness = \text{Max}_j(z_{ij} - \bar{z}) - \text{Min}_j(z_{ij} - \bar{z}) \quad (20)$$

여기서, 는 최소자승법등에 의해 결정되는 평균 기준 평면상의 높이 데이터를 나타내며,  $Z_{ij}$  는 위치(x,y)에서의 높이 측정 데이터를 의미한다.

또한, 미소 표면 형상의 3 차원 표면 거칠기를 해석하는 시스템을 구현하였으며, 삼차원 평균 거칠기,  $S_a$ , 삼차원 제곱 평균 거칠기,  $S_q$ 를 구현하는 알고리즘을 개발하였다..

삼차원 평균 거칠기,  $S_a$ 는 측정데이터로부터 중심평면을 구한 후, 중심평면으로부터의 거리의 절대값의 합의 평균으로 나타내며, 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[8]</sup>.

$$S_a = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |z_{ij} - \bar{z}| \quad (21)$$

여기서, M,N 은 각각 x,y 방향으로의 점의 갯수를 나타낸다.

삼차원 제곱 평균 거칠기,  $S_q$ 는 구해진 중심평면으로부터의 거리의 제곱합의 평균의 제곱근으로 나타내며, 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[8]</sup>.

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (z_{ij} - \bar{z})^2} \quad (22)$$

위와 같은 표면 파라미터를 구하는 알고리즘을 개발된 측정 시스템에 구현하였다. 개발된 측정 시스템을 DRAM 반도체 웨이퍼 표면의 측정에 적용하여, 여러 곳의 위치에서 3 차원 미소 표면 형상 측정을 수행하였다. Fig.10a 는 에칭된 IC 의 3 차원 미소형상 패턴을 측정한 것을 보여주고 있으며, 20mmX20mm 의 측정 영역을 수평방향 0.2 mm 간격으로 광학 프로브를 이용하여 측정을 수행하였다. 평면도는 0.781mm, 삼차원 평균 거칠기( $S_a$ )는 0.247mm, 삼차원 제곱 평균 거칠기( $S_q$ )는 0.260mm 로 각각

평가되었다. 동일한 측정 조건에서 웨이퍼 내의 또 다른 측정면을 측정하였으며, 에칭된 글자 모양의 미소형상 패턴의 측정 결과가 Fig.9b 에 나타나 있다. 평면도는 0.492mm, 삼차원 평균 거칠기 ( $S_a$ ), 삼차원 제곱 평균 거칠기( $S_q$ )는 각각 0.100mm, 0.121mm 로 평가되었다.

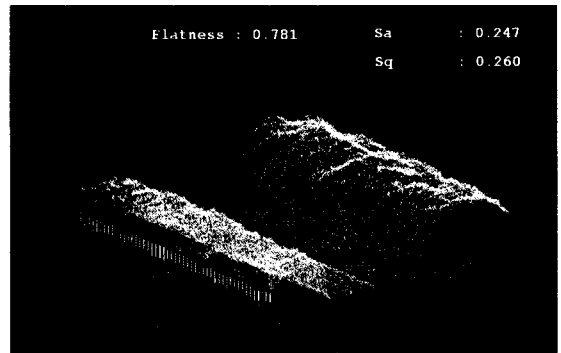


Fig. 10a 3D Plot of a Wafer Surface Measurement

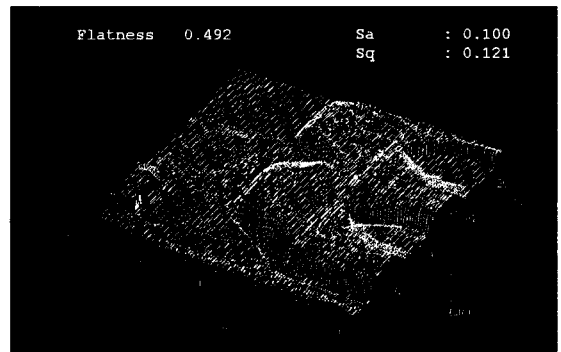


Fig. 10b 3D Plot of a Wafer Surface Measurement

## 5. 결론

반도체 웨이퍼 표면 등의 3 차원 미소형상을 측정할 수 있는 비접촉식 3 차원 측정 시스템이 구현되었으며, 하나의 새로운 측정방법으로서 현재 관련 국외 특허등록<sup>[9,10]</sup>을 승인 받았으며, 결론은 다음과 같다.

(1) 초점이 맞지 않은 상의 번짐을 이용하는 비초점 계측 방식에 의하여 높이를 측정하는 새로운 광학 프로브를 설계, 구현하였으며, 이 시스템은 라인 스캐닝 특성을 가지므로 다양한



적용 분야와 빠른 측정 속도를 가진다.

(2) 번짐이 있는 상의 크기와 높이와의 관계식을 규명하였으며, 정밀한 He-Ne 레이저 인터페로미터를 이용하여 그 관계식을 보정하였다.

(3) 삼차원 미소형상의 정밀한 측정을 위해서, 약 10 나노미터의 해상도에 72 나노미터의 불확도 (Four sigma uncertainty)를 가지는 비접촉식 측정방법을 개발하였다.

(4) 웨이퍼 표면의 넓은 범위의 영역을 측정하기 위하여, 정밀급 XY 스테이지, Z-W-0 스테이지를 설계, 구현하였으며, 사용자 편의 환경의 소프트웨어에 의하여, 측정 영역을 쉽게 선택할 수 있게 하였다.

(5) 평면도, 삼차원 표면 거칠기와 같은 다양한 표면 파라미터 계산 알고리즘을 개발하였다.

(6) 개발된 시스템을 웨이퍼 표면 측정에 적용하여, 성공적으로 측정이 수행됨을 확인하였고, 많은 종류의 표면 측정에 사용될 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 학술 진흥 재단의 부분적인 연구비 지원에 의해 이루어졌음을 밝힙니다.

## 참고문헌

1. Stedman, M., Limits of topographic measurement by the scanning tunneling microscopes, *Journal of microscopy*, Vol.152(3), pp. 611-618, 1988.
2. SEM PROBE- An automated analytical scanning electron microscope (Product Information), *Cameca Ltd.*, 1992.
3. SEM-IPS 10/500-Image Analysis System for SEM (Product Information), *Kontron Bild Analyse Ltd.*, 1992.
4. Subbarao, M., Surya, G., Depth from defocus: A special domain approach, *International J. of computer vision*, 13(3), pp. 271-294, 1994.
5. Subbarao, M., Choi, T., Accurate recovery of three dimensional shape from image focus, *IEEE Transactions on Pattern analysis and Machine Intelligence*, 17(3), 1995.
6. Pahk, H., Ahn, W., and Cho, S., Development of noncontact measuring machine for 3D micro pattern in semiconductor wafer using a new optical probe implementing high performance optical window, *Proc. of ASPE Annual Meeting*, pp. 434-437, 1997.
7. 안우정, 박희재, 컴퓨터 비전과 광학창을 이용한 삼차원 미소형상 측정 시스템 개발, *대한기계학회 춘계학술대회논문집 A*, pp. 605-609, 1997.
8. Stout, K, etal. The development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions, *Brussels-Luxembourg and Authors*, 1993.
9. H.J.Pahk etal. Noncontact Measuring Method for Three Dimensional Micro Pattern of Measuring Object using Optical Window, *US Patent Approved*, 1999.
10. H.J.Pahk etal. Noncontact Measuring Method for Three Dimensional Micro Pattern of Measuring Object using Optical Window, *Japanese Patent Approved*, FEI-9706.