

실리콘 웨이퍼 휨형상 측정 정밀도 향상을 위한 시스템변수 보정법

김병창*#

(#*경남대학교 기계공학부)

System calibration method for Silicon wafer warpage measurement

ByoungChang Kim*#

(Received 6 November 2014; received in revised form 30 December 2014; accepted 31 December 2014)

ABSTRACT

As a result of a mismatch of the residual stress between both sides of the silicon wafer, which warps and distorts during the patterning process. The accuracy of the warpage measurement is related to the calibration. A CCD camera was used for the calibration. Performing optimization of the error function constructed with phase values measured at each pixel on the CCD camera, the coordinates of each light source can be precisely determined. Measurement results after calibration was performed to determine the warpage of the silicon wafer demonstrate that the maximum discrepancy is $5.6\mu m$ with a standard deviation of $1.5\mu m$ in comparison with the test results obtained by using a Form TalySurf instrument.

Key Words : silicon wafer(실리콘웨이퍼), warpage measurement(휨형상 측정), CCD camera(카메라), Fringe pattern(간섭무늬 패턴), calibration(보정), system parameter(시스템변수)

1. 서 론

전자산업은 반도체 산업과 함께 동반 발전했다
고 해도 과언이 아니다. 반도체가 등장하면서 기
존의 아날로그 기반 전자제품들은 디지털 신호를
기반으로 하는 제품으로 진화하였고, 이를 통해
급격한 발전을 이룰 수 있었다. 소형화, 다기능화

를 추구하는 최근 전자제품들의 핵심기술은 고집
적 반도체 칩을 구현할 수 있는 기술과 이를 대량
생산할 수 있는 제조공정기술에 기반을 두고 있
다. 반도체 칩은 Fig.1과 같이 실리콘 웨이퍼링공
정(Wafering), 패터닝공정(Patterning), 패키징공정
(Packaging)의 3단계 제조공정을 거쳐 제조 생산된
다. 패터닝공정은 얇은 실리콘 웨이퍼 위에 노광
(Lithography)을 통해 미세한 회로를 식각(etching)
시키는 공정이며, 패키징 공정은 패터닝된 실리콘
웨이퍼를 조각으로 잘라(wafer singulation) 한 개의
모듈화된 칩을 생산하는 단계이다. 패터닝공정에
서는 실리콘 웨이퍼의 양면 중 오직 한 면만을 식

*School of Mechanical Engineering, KYUNGNAM UNIV.

Corresponding Author :

School of Mechanical Engineering, KYUNGNAM UNIV.

E-mail : bckim@uok.ac.kr

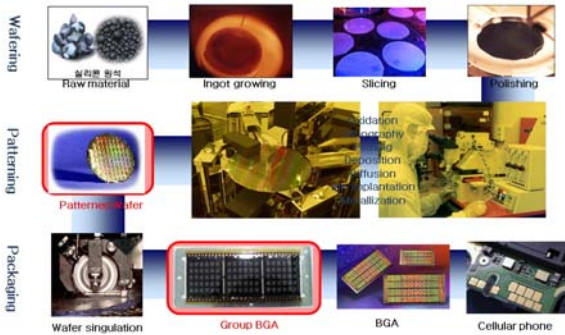


Fig. 1 Manufacturing process of semiconductor

각하기 때문에 양면간의 응력차에 의해 웨이퍼가 휘는 현상(warping)이 발생한다. 또한 생산단가를 낮추기 위해 실리콘 웨이퍼의 직경을 지속적으로 증가시키는 추세에 있어 두께가 얇은 웨이퍼에 휨 현상은 더욱 쉽게 발생한다. 발생된 웨이퍼 휨 현상은 불완전한 패턴 전사를 유발시켜 불량칩을 생산하는 원인을 제공한다. 패키징공정에서도 높은 공정온도에 의해 칩을 감싸고 있는 패키지(Epoxy mold compound) 자체에 휨 현상이 발생하므로 반도체 제조 전 공정에 걸쳐 실시간으로 웨이퍼 또는 칩 패키지 모듈의 휨 현상을 측정하는 것은 대단히 중요하고 필요한 공정이다. 하지만 웨이퍼와 패키징 모듈은 산란표면을 가지고 있어, 미세 휨 현상을 고정밀도로 측정할 수 있는 방법이 상당히 제한적이다.

거친표면의 고정밀 형상측정을 위해서는 장파장(long wave length)광원을 사용하거나^[1], 측정표면에 광학패턴을 투영시키는 방법이 대표적이다. 웨이퍼 또는 칩 패키지의 휨 현상을 측정하기 위해 Han은 적외선(Infrared)광원 피조간섭계(Fizeau interferometry)^[2]와 모아레법(Moire)을 사용하였으며^[3], Kim은 이웃한 점회절광원을 이용하여 측정표면에 패턴을 투영(projection)시키는 방법을 적용하였다^[4]. 장파장 광원을 사용하는 방법은 고가의 장비가 필요한 반면 패턴 투영법은 간단하게 측정 시스템을 구성할 수 있는 장점을 가진다. 하지만 고정밀 측정을 위해서는 측정시스템에 부여된 시스템 변수(system parameters)의 보정 정밀도가 측정정밀도와 밀접하게 연계되어 있어 시스템 보정법이 매우 중요하다.

본 논문은 광학패턴을 투영하여 산란표면의 형상을 측정하는 방법에서 시스템 변수를 효과적으로 보정하는 방법을 제시하고 결과를 고찰한다.

2. 시스템변수 보정

3차원 형상측정이란 측정대상 표면의 각점들에게 기하학적 좌표(x, y, z)를 부여하는 과정이다. 수학적 측면에서 본다면 3개의 미지수를 결정하기 위한 3원 연립방정식의 해를 구하는 과정으로도 정의할 수 있다. 측정방식에 따라 연립방정식은 1차선형방정식에서부터 고차비선형방정식 등 다양하게 나타날 수 있지만, 한 가지 공통적인 현상은 연립방정식 내에 시스템변수를 항상 포함하고 있다는 것이다. 즉, 최종적으로 결정해야 할 3개의 해(x, y, z)를 제외하고도 공간에 존재하는 각종 시스템 변수들이 존재한다. 결국 최종적으로 결정되는 해의 신뢰성은 변수의 정확도와 밀접한 관계를 가지게 된다.

2.1 CCD를 이용한 시스템변수 보정법

산란표면을 가진 형상은 일반적으로 측정대상 표면에 일정 패턴을 투영시키고, 투영된 패턴을 결상(imaging)시켜 패턴으로부터 획득된 정보를 이용해 3차원 좌표를 결정한다. Fig.2는 산란표면의 형상을 측정하기 위한 가장 일반적이고 간단한 구

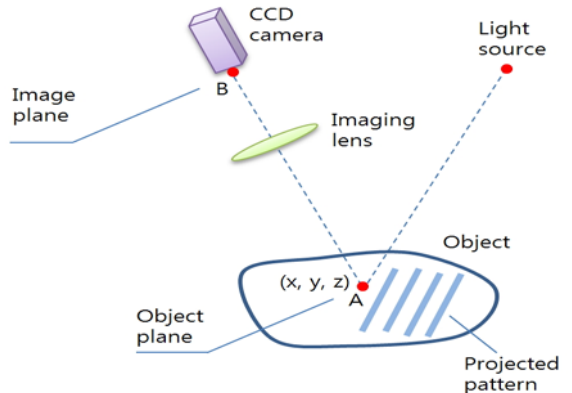


Fig.2 Typical configuration of scattering surface metrology

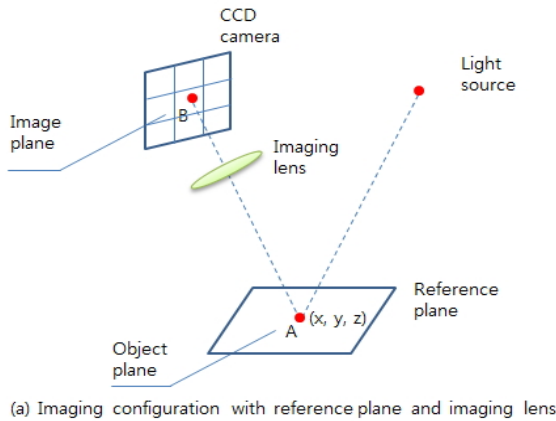
성도이다. 물체면(object plane)의 모든 정보는 결상렌즈(imaging lens)를 통해 결상면(image plane)으로 이동되므로, 두 면을 공액면(conjugate plane)으로 부른다.

Fig.2의 기본구성을 기반으로 다양한 구성과 응용방법이 제시될 수 있는데, 대부분 광원(light source)의 위치, 카메라의 위치 또는 각 요소들 간의 상대위치가 시스템변수로 정의된다. 직접적으로 변수를 측정하는 등 시스템변수를 결정하기 위한 방법은 다양하지만 시스템변수가 잘 정의되었는지를 확인하기 위해서는 Fig.3 (a)와 같이 최종적으로 기준평면(Reference plane)을 이용한 보정과정(Calibration)이 필수적이다. 즉, 물체면에 산란표

면특성을 가진 기준평면을 위치시키고 3차원형상을 측정하였을 때, 완전평면을 복원시킬 수 있는지의 과정이 필요하다. 하지만, 거울면(specular surface)과 달리 산란표면을 가진 기준면의 제작은 평면도(Flatness) 구현이 쉽지가 않다.

즉, 기준평면으로서의 신뢰도를 보장하기가 쉽지가 않으며, 나아가 시스템변수와 최종적으로 결정되는 3차원 좌표값에 대한 불확도(uncertainty)가 높아짐을 의미한다.

완벽한 기준평면을 대체할 수 있는 방법으로 Fig.3 (b)와 같이 카메라의 화소면을 물체면에 두어 광원위치와 관련된 시스템변수를 결정할 수 있게 된다.^[5] Fig.2에서 결상렌즈를 기준으로 물체면과 영상면은 서로 공액면이므로 영상면에 위치한 카메라를 물체면으로 이동시켜도 광학적으로는 동일한 의미를 가진다. 물체면으로 이동된 카메라의 화소면은 반도체 과정을 통해 정교하게 제작된 거울면의 평탄도를 가질 뿐만 아니라, 물체면과 결상면의 역할을 모두 가지게 된다.



2.2 시스템변수 보정 적용

2.1에서 제안한 시스템변수 보정법을 두 점광원의 위치와 관련된 6개의 위치변수(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)를 보정하는데 적용하였다. Fig.4와 같이 공간상에 이웃하게 위치한 두 점광원은 물체면인 CCD에서 상호간섭하여 Fig.5와 같은 광패턴을 형성한다.

CCD 상의 (i,j)번째 화소($x_i, y_j, 0$) 좌표점에서 획득되는 광강도(intensity)는 두 점광원으로부터 출발한 광의 위상차와 관련이 있으며, 위상차(Φ_{ij})를 6개의 점광원 위치변수로 표현하면 식1과 같다.

$$\Phi_{ij} = k [r_{ij} - r'_{ij}] \quad (1)$$

여기에서 $r_{ij} = \sqrt{(x_1 - x_i)^2 + (y_1 - y_j)^2 + (z_1)^2}$, $r'_{ij} = \sqrt{(x'_1 - x_i)^2 + (y'_1 - y_j)^2 + (z'_1)^2}$ 이며, k 는 전파상수(wave number)를 나타낸다. (i, j)화소의 좌표값인 ($x_i, y_j, 0$)은 CCD 화소의 크기를 이용해 결정할 수 있으므로 이미 결정된 시스템변수이다.

식1에서 6개의 미지수(x_1, y_1, z_1), (x'_1, y'_1, z'_1)를 결정하기 위해 CCD의 640×480 화소에서 획득되는 위

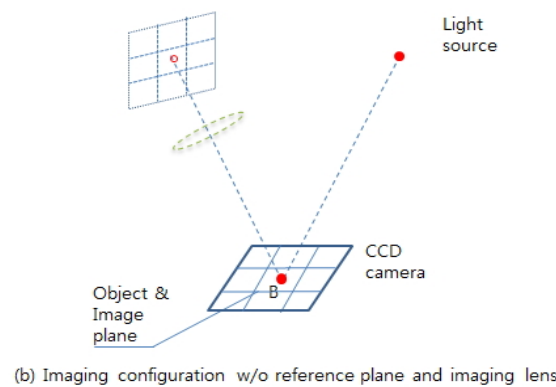


Fig.3 Configuration of system parameter calibration using CCD plane

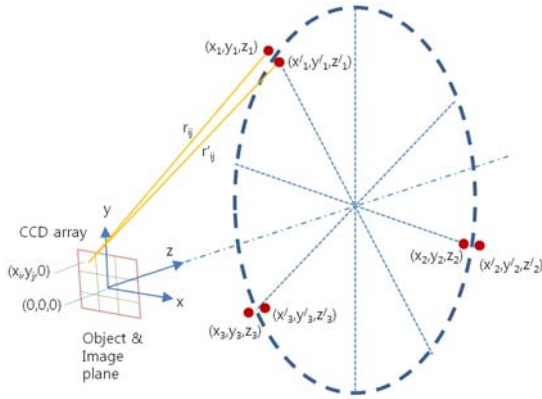


Fig. 4 Configuration of calibration for two points light sources parameters



Fig. 5 Fringe patterns projected on CCD

상차를 이용하여 식2와 같이 오차함수(Error function)을 구성하였다.

$$E(x_1, y_1, z_1, x'_1, y'_1, z'_1) = \sum_{i=1, j=1}^{640 \times 480} [\Phi_{ij} - k(r_{ij} - r'_{ij})] (2)$$

오차함수 최적화를 위한 방법들이 다수 알려져 있지만, 식2와 같이 다소 복잡한 비선형 오차함수에서는 여러 개의 국소 최소값(local minimum)을 가지고 있으므로, 본 논문에서는 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 이용하여 최적화를 수행하였다.^[6]

2.3 시스템변수 보정결과

2.2에서 제안된 점광원의 시스템변수 보정법을 통하여 공간에 흩어져 있는 점광원쌍들의 공간좌표를 순서적으로 결정하였다. 시스템변수 보정에 사용된 Fig.3(b)의 CCD카메라는 2.1에서 언급한 바와 같이 산란표면을 가진 가상의 절대기준평면으로 대체될 수 있으므로, CCD 촬상면에서 획득된 간섭패턴을 이용하여 형상을 복원함으로써 보정과정의 신뢰도를 검증할 수 있다.

3차원 형상 복원과정은 공간좌표를 알고 있는 세 위치로부터 임의의 지점까지의 거리를 측정하여 공간좌표를 결정하는 GPS(Global Position System)원리에 근거한다^[4]. 2.1에서 제안한 보정법에 따라 Fig.4에 표시된 3쌍의 점광원의 위치 $(x_i, y_i, z_i), (x'_i, y'_i, z'_i) \ i=1,2,3$ 가 각각 결정하면, 물체면 주위에 위치한 임의의 공간좌표 (x, y, z) 는 식3과 같이 3개의 연립식으로 표현될 수 있다. 식3의 해는 Newton Rapson 등과 같은 수치해석을 적용하여 결정될 수 있다.

$$\Phi_i = k [\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} - \sqrt{(x - x'_i)^2 + (y - y'_i)^2 + (z - z'_i)^2}] \quad (3)$$

$i = 1, 2, 3.$

여기서 i 는 광원부의 순서이며, Φ_i 는 측정점 (x, y, z) 에서 획득된 i 번째 두 점광원 사이의 위상차 값이다.

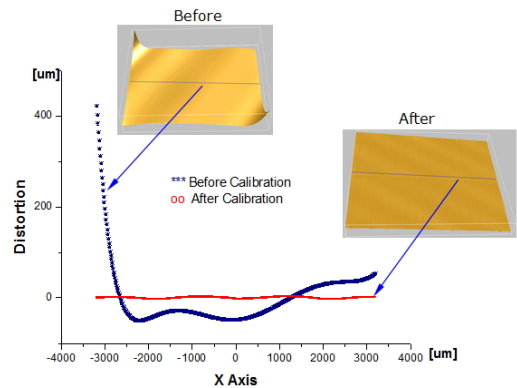


Fig. 6 Measurement results after calibration

Fig.6은 보정된 점광원 좌표값과 보정 이전의 좌표값을 이용한 CCD 촬상면의 형상복원 결과를 보여준다. 보정 전 최대 $500\mu\text{m}$ 를 보이던 PV가 보정 후 $3\mu\text{m}$ PV로 복원됨을 확인할 수 있다.

3. 측정결과

3.1 측정 시스템 구성

위치 좌표 보정을 마친 점광원이 장착된 측정 시스템은 Fig.7과 같다. Fig.4에서 표현된 것과 같이 점광원은 카메라 광축으로부터 일정 거리 떨어진 위치에 정삼각형 구조로 놓이며, 점광원은 Fig. 8과 같이 이웃하는 2개의 광섬유로 구성되어 있다. 광원에 사용된 튜브압전소자(Tube PZT)는 생성된 간섭무늬로부터 위상을 결정하기 위하여 사용하였다.

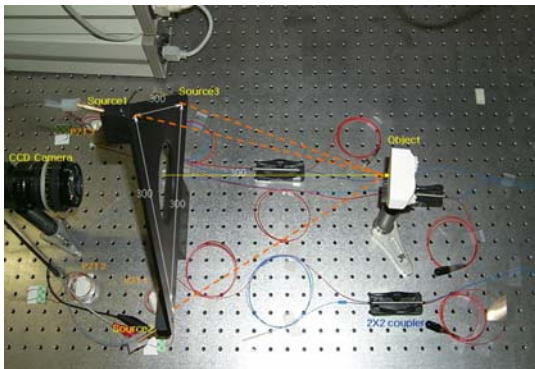


Fig. 7 Photograph of measurement system setup

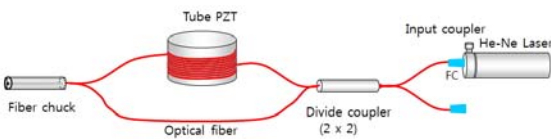


Fig. 8 Configuration of light source with two fibers

3.2 실리콘 웨이퍼 형상측정

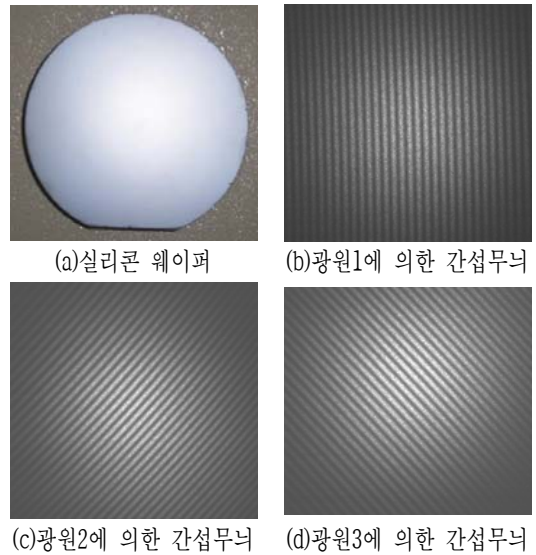


Fig.9 Fringe patterns projected on the wafer

패터닝 공정 중 실리콘 웨이퍼의 휨형상을 측정하기 위해서 Fig.9(a)와 같이 광산란특성을 가진 표면에 Fig.4의 점광원쌍을 순차적으로 발산시켜 공간에 광간섭 패턴을 생성시켰다. 이웃하는 두 점광원 사이의 광간섭에 의해 생성된 일정패턴무늬는 물체면에 놓인 실리콘 웨이퍼 표면에 투영되며, 점광원의 상대위치에 따라 Fig.9(b), (c), (d)와 같이 간섭패턴의 모양은 다르게 나타난다.

3개의 점광원쌍에서 생성한 각각의 패턴무늬로부터 위상차를 계산하고, 식3을 이용하여 가공 중

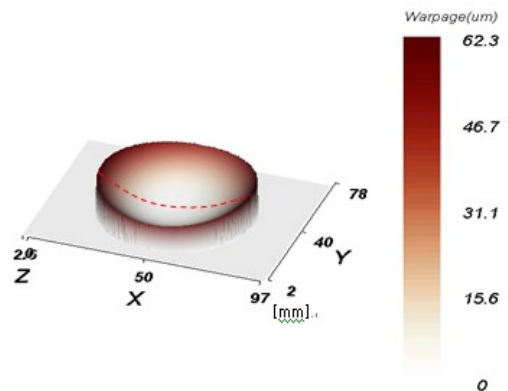


Fig.10 Reconstructed surface profile of wafer

왜곡된 실리콘 웨이퍼 표면의 좌표를 계산하였다. 계산된 좌표를 이용해 휘어진 실리콘 웨이퍼의 형상을 복원한 결과 Fig.10과 같이 62mm 측정영역에서 최대 62.3 μm 의 왜곡이 발생하였음을 확인하였다.

3.3 형상측정 정밀도 검증

측정 정밀도를 확인하기 위하여 광산란표면의 프로파일 측정이 가능한 Rank Taylor Hobson사의 Form Talysurf 접촉식 스타일러스와 중심선 형상을 비교 측정하였다. 비교측정결과 Fig.11와 같이 62mm 측정영역에 대해 PV 5.6 μm , 분산 1.5 μm 의 측정오차가 발생함을 확인하였다.

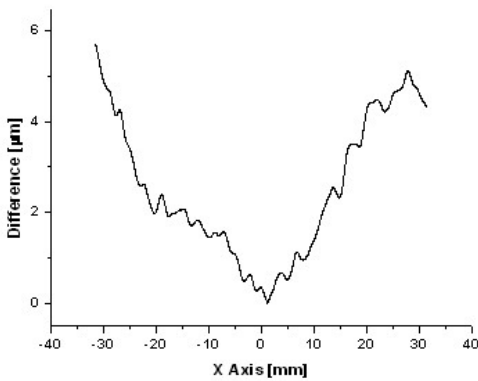


Fig.11 Residual error compared with commercial stylus instrument

4. 결론

본 연구에서는 패터닝의 식각공정 중 양면의 응력차에 의해 왜곡되는 실리콘 웨이퍼 휨형상의 측정 정밀도 향상을 위해 시스템변수를 보정하는 방법을 제시하였다. 측정 대상이 되는 실리콘 웨이퍼의 표면특성은 광산란되는 특성을 가지고 있어, 표면에 일정패턴을 투영시킨 후 패턴을 해석하여 형상 좌표를 계산하는 방법을 적용하였다. 형상을 복원하는 과정 중에 시스템변수인 광원의 위치좌표를 정밀하게 결정하기 위해 절대기준면으

로 CCD카메라를 물체면에 놓고 보정하는 방법을 수행하였다. 보정 결과 최대 500 μm 의 왜곡을 보이던 기준면이 최대 3 μm 로 향상됨을 보였으며, 보정된 시스템오차를 이용해 공정 중 왜곡된 실리콘 웨이퍼의 형상 측정에 적용한 결과, 62mm 측정영역에서 최대 5.6 μm 비교오차가 발생함을 확인하였다. 이는 광원의 위치를 시스템변수로 사용하는 모든 광학식 측정에서 위치보정의 중요성을 확인한 결과이며, 보정 정밀도 향상에 따라 측정 정밀도도 향상됨을 확인할 수 있었다.

REFERENCES

1. O. Kwon, J. Wyant, Hayslett, "Rough surface interferometry at 10.6 μm ," Appl. Opt., vol.19, no.11, pp.1862-1866, 1980.
2. K. Verma, B. Han, "Warpage Measurement on Dielectric Rough Surfaces of Microelectronics Devices by Far Infrared Fizeau Interferometry," Journal of Electronic Packaging, Vol. 122. No. 3, pp. 227-232, 2000.
3. B. Han, D. Post, P. Ifju, "Moire interferometry for engineering mechanics:current practices and future developments," Journal of Stain Analysis for Engineering Design, Vol.36, No.1, pp.101-117, 2001.
4. B.C. Kim, S.W. Kim, "Absolute interferometer for three-dimensional profile measurement of rough surfaces," Optics Letters, Vol.28, No.7, pp.528-530, 2003.
5. B.C. Kim, S.W. Kim, "Multiple-point-diffraction interferometer : Error Analysis and Calibration," Korean Journal of Optics and Photonics, Vol.16, No.4, pp.1-5, 2005.
6. Cezard Z. Janikow, Zbigniew Michalewicz, "A specialized genetic algorithm for numerical optimization problems," Proc 2 Int IEEE Conf Artif Intell, pp.798-783, 1990.