

## 광산란 거친표면의 고정밀 삼차원 형상 측정을 위한 점회절 간섭계

김병창<sup>†</sup> · 이호재 · 김승우

한국과학기술원 기계공학과

☎ 305-701 대전시 유성구 구성동

(2003년 3월 13일 받음, 2003년 9월 24일 수정본 받음)

최근 전자산업계에 새롭게 널리 생산되는 마이크로 전자부품들은 왜곡이 최소화된 정밀한 외관 형상을 갖도록 제조되고 관리되지만, 측정 대상의 표면이 가시광 영역에서 광산란되는 특징을 가짐으로 인해, 기존의 피조나 마이켄슨 형태의 비교간섭법으로는 고정밀의 삼차원 형상측정이 용이하지 아니하였다. 본 논문에서는 광섬유를 이용한 새로운 개념의 점회절 간섭계를 제안하고, 이를 광산란 거친표면의 대표적인 제품인 칩패키지와 실리콘 웨이퍼의 삼차원 형상 측정에 적용하였다. 측정결과 66 mm 측정영역에서 측정 형상오차 PV(peak-to-valley value) 5.6  $\mu\text{m}$ , 분산값( $\sigma$ ) 1.5  $\mu\text{m}$ 를 획득함으로써 기존의 비교 간섭 측정법에 비해 더욱 향상된 측정 정밀도를 획득하였다.

주제어 : point-diffraction interferometer, lightscattering surface, surface profile measurement, optical fiber.

### I. 서 론

일반적으로 물체 표면의 삼차원 형상을 측정하는 방법들은 트와이만-그린, 피조 간섭계 등과 같이 광분할기에 의해 두 광으로 양분된 후, 이상적인 기준면과 측정 표면에 의해 각각 반사되는 기준광과 측정광과의 간섭을 이용하는 비교 간섭법(two-arm interferometry)이 널리 이용되어왔다. 이러한 비교 측정법은 기준광에 대한 측정광의 광경로차에 의해 형성되는 간섭부리의 공간주파수가 CCD(Charge-Coupled Device) 카메라 화소(pixel)의 나이퀴스트 주파수(Nyquist frequency)내로 한정되어야 한다. 그렇지 못한 경우, 위상 연속화(Phase unwrapping) 과정에서  $2\pi$  모호성(ambiguities) 문제가 발생하여 궁극적으로 정량적 해석이 실패하게 된다. 이러한 현상은 광 파장 수준의 불균일한 높이 형상을 가진 거친표면의 형상 측정에서 주로 나타나는데, 이러한 문제를 극복하고자 긴 파장인 적외부 광원(infrared light source)<sup>[1,2]</sup>을 측정 광원으로 사용하거나, 경시입사법(grazing incidence)<sup>[3]</sup> 또는 이중파장(two-wavelength synthesis)<sup>[4]</sup>을 이용해 등가파장을 확장시켜 광원으로 사용하였다. 이러한 측정 방법들은 거친 표면의 산란성을 극복하기 위해 파장을 증가시키는 방법을 사용함으로써 결과적으로 낮은 측정 정밀도를 획득할 수 밖에 없었다. 한편, 좁은 측정영역에 대해서는 고정밀 구동부를 가진 백색광(White light)<sup>[5]</sup>도 대안이 되며, 광대역 변조 반도체 레이저(wideband tunable diode lasers) 활용을 통한 연속 주파수 변조방식(continuous frequency modulation)인 다중 파장 간섭법(multiple-wavelength interferometry)<sup>[6]</sup> 등도 현재 활발하게 연구되고 있다.

본 논문에서는 가시광 영역에서 광산란 현상을 보이는 거친 표면의 삼차원 형상 측정을 위해 멀티레터레이션에 근거한 새

로운 개념의 점회절 간섭계를 제안하고, 광섬유를 이용하여 시스템을 구성한다. 구성된 시스템은 산업계에서 고정밀 형상 측정을 요구하는 대표적인 제품인 광산란 표면의 칩 패키지과 실리콘 웨이퍼의 삼차원 형상 왜곡을 측정하는데 적용되었으며, 실제 형상 측정을 통하여 획득된 결과를 스타일러스 측정기와 비교함으로써 측정 정밀도를 검증하고자 한다.

### II. 측정이론

공간 임의의 한 점의 위치를 결정하기 위해서는 위치를 알고 있는 최소 3개의 임의의 점(station)으로부터 측정점까지의 거리를 알면 측정점의 위치 결정이 가능하다. 이 개념은 GPS(Global Positioning System)로 공간에서 한 지점의 위치를 인식하는데 널리 사용되고 있으며, 포괄적인 개념으로 멀티레터레이션(Multilateration)으로도 알려져 있다.<sup>[7]</sup> 본 논문에서는 멀티레터레이션에 근거하여 광산란 거친표면의 삼차원 형상을 측정하는 새로운 방식의 점회절 간섭계를 제안함으로써 기존의 비교 간섭계에서 구현하지 못한 고정밀도의 형상측정 정밀도를 실현하고자 한다. 그림 1은 본 논문에서 새롭게 제안하는 점회절 광원을 이용한 멀티레터레이션법의 원리를 설명한다. 점광원으로부터 일정각도를 가지고 발산하는 구면광(Spherical wave)는 측정 대상물의 넓은 영역에 걸쳐 도달한다. 멀티레터레이션법을 적용하기 위해 두 개 이상의 다른 점광원부에서도 물체위의 동일한 영역에 광이 도달하도록 정렬하고 일정각도의 구면광을 발생시킨다. 점광원부와 측정점까지의 거리 정보를 획득하기 위해 가간섭거리가 긴 단일파장을 광원으로 하는 두 점광원을 가깝게 이웃시켜 점광원부를 구성하면 각각의 점광원에서 발산하는 두 구면광은 공간에서 간섭하여 측정물 표면의 형상에 따라 간섭부리를 형성하고, 간섭부리로부터 획득되는 위상값은 측정점에서 각각의 점광원까지의 거리차 정보

<sup>†</sup>E-mail: spiggy@kaist.ac.kr

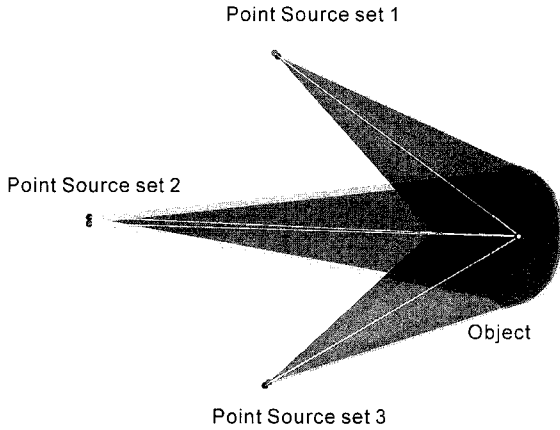


그림 1. 점회절 광원부를 사용한 새로운 개념의 멀티테라레이션 측정법의 원리.

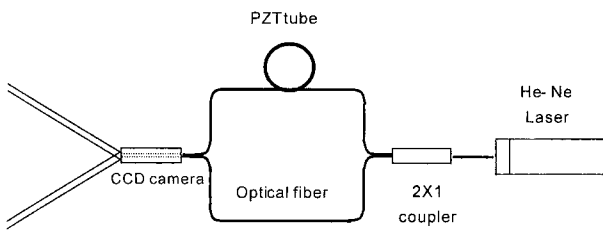


그림 2. 광섬유를 이용한 점회절 광원부의 전체 구성도.

를 제공한다.<sup>[8]</sup> 이를 기존의 멀티테라레이션법에서 사용하는 거리정보로 대체하여 이용할 수 있다. 간섭부너로부터 절대위상을 획득하기 위해서 두 점광원중 한 개에 위상변화를 줌으로써 위상천이법(Phase shifting algorithm)을 실현하였다.

이웃하는 두 점광원으로 구성된 광원부를 구현하기 위해 그림 2와 같이 중심파장이 633 nm인 He-Ne 레이저광을 광도파로시키는 단일모드 광섬유를 사용하였다. 직경이 2 μm인 두 광섬유 코어의 끝단에서 발산되는 구면파를  $u_1$ 와  $u_1'$ 로 정의하면 다음과 같이 표현된다.

$$u_1 = \frac{A_1}{r_1} e^{-j(kr_1 + \phi_1)}, \text{ where } r_1 = \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} \quad (1)$$

$$u_1' = \frac{A_2}{r_1'} e^{-j(kr_1' + \phi_2)}, \text{ where } r_1' = \sqrt{(x_1' - x)^2 + (y_1' - y)^2 + (z_1' - z)^2} \quad (2)$$

위 수식에서  $\phi_1$ 와  $\phi_2$ 는  $(x_1, y_1, z_1)$ 와  $(x_1', y_1', z_1')$ 에서 구면 발산한  $u_1$ 와  $u_1'$ 의 초기 위상값이다. 두 발산 구면광  $u_1$ 와  $u_1'$ 는 측정물체 표면에서 간섭하는데 형성되는 간섭부너의 광강도식은 다음과 같이 표현된다.

$$I(x, y, z) = |u_1(x, y, z) + u_1'(x, y, z)|^2 = a(x, y, z) + b(x, y, z) \cos[\Phi(x, y, z)]$$

$$\text{where } a(x, y, z) = \frac{A_1^2}{r_1^2} + \frac{A_2^2}{r_1'^2}, \quad b(x, y, z) = 2 \frac{A_1 A_2}{r_1 r_1'}$$

$$\Phi(x, y, z) = k(r_1 - r_1') + \Delta\phi, \text{ and } \Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (3)$$

여기에서  $a(x, y, z)$ 는 배경광,  $b(x, y, z)$ 는 가시도,  $\Phi(x, y, z)$ 는 위

상을 표현한다. 위상값  $\Phi$ 를 결정하기 위해서 두 점광원 중 한 광원의 위상을 변화시켜 줌으로써 위상천이법(Phase Shifting Technique)을 적용하였는데, 이는 그림 2에서 2×1 커플러에서 분기된 두 광섬유 중 한 개를 튜브 압전소자(PZT)에 감은 뒤 전압을 가하여 광섬유의 길이를 변화시킴으로써 구현하였다.

복원된 절대위상값  $\Phi$ 는 측정점과 두 점광원간의 공간 거리차  $k(r_1 - r_1')$ 뿐만 아니라, 두 점광원의 초기 위상차  $\Delta\phi$ 를 함께 포함하고 있으므로 절대위상값  $\Phi$ 에서 공간 거리 정보만을 이용하기 위해서 식 (4)와 같이 초기 위상차가 제거된 새로운 위상식을 정의한다.

$$\Lambda(x, y, z) = \Phi(x, y, z) - \Phi(x_0, y_0, z_0) \quad (4)$$

여기서  $\Phi(x_0, y_0, z_0)$ 는 측정 물체상에 존재하는 임의의 좌표점에서의 절대위상값이다. 따라서 새롭게 정의된 식 (4)로부터 물체 형상  $(x, y, z)$ 를 결정하기 위해서는 3개의 미지수  $(x_0, y_0, z_0)$ 가 추가로 결정되어야 한다. 이는 6개 이상의  $\Lambda(x, y, z)$ 이 획득되어야 하며, 이를 위해서는 6개 이상의 점광원부가 필요하게 된다. 6개의 미지수는 식 (5)의 오차함수를 최소화 시키는 최적점을 통해 획득할 수 있다.

$$E(x, y, z) = \sum_{i=1}^N [\{\Phi_i(x, y, z) - \Phi_i(x_0, y_0, z_0)\} - \hat{\Lambda}_i(x, y, z)]^2 \quad (5)$$

여기에서  $i$ 는 점회절 광원부의 순서이며, 미지수를 결정하기 위해서는  $N$ 이 6 이상이 되어야 한다.  $\hat{\Lambda}_i(x, y, z)$ 는 실제 측정을 통해 획득된 위상값이며,  $\Phi(x, y, z)$ 와  $\Phi(x_0, y_0, z_0)$ 는 절대위상과 미지수 사이의 기하학적 거리 관계를 표현하는 식이다. 6개의 미지수 중 3개의 미지수  $(x_0, y_0, z_0)$ 는 측정 물체의 첫번째 점  $(x, y, z)$ 을 결정할 때에만 결정되면 두번째 점 이후로는 반복하여 사용되므로, 두번째 점 이후의 좌표결정시에는 3개의 점광원부에서 획득된 수식으로부터 형상 좌표값을 결정할 수 있다. 수식(5)로부터 6개의 미지수를 결정하는 방법으로는 널리 알려진 선형화 방법인 Newton-Rapson법을 사용하였다. 점광원부의 좌표값  $(x_1, y_1, z_1)$ 와  $(x_1', y_1', z_1')$  결정은 전체적인 측정 정밀도에 크게 영향을 주는데 이는 CCD카메라를 이용한 비선형 최적화 방법을 사용하여 결정하였다.<sup>[9]</sup>

### III. 측정 시스템 및 결과

6개의 광원부를 가진 점회절 간섭계의 시스템은 그림 3과 같이 구성되었으며, 이를 그림 4와 같이 실현하였다. 프레임은 그림 4와 같이 직경 150 mm의 홀(hole)과 직경 300 mm의 원주 위에 45° 간격으로 위치하는 7개의 홀로 구성된다. 프레임 중심의 큰 홀은 CCD카메라가 간섭부너를 관찰하기 위해 제작되어졌으며, 작은 7개의 홀에 점회절 광원부인 광섬유 칩이 삽입되는데 프레임면으로부터 70° 각도로 기울어져 정렬된다. 7개의 홀 중에서 대칭이 되도록 6개를 선택하여 사용하였으며, 6개 중 3개는 측정을 위한 광원부이며, 나머지 3개는 최초에  $(x_0, y_0, z_0)$ 를 결정할때만 사용되는 광원부이다. 본 논문에서 제안하고 구현된 시스템으로 광산란 거친표면을 가진 마이크로 전자부품의 휘형상을 측정하였다. 그림 5는 개발 과정 중에 있

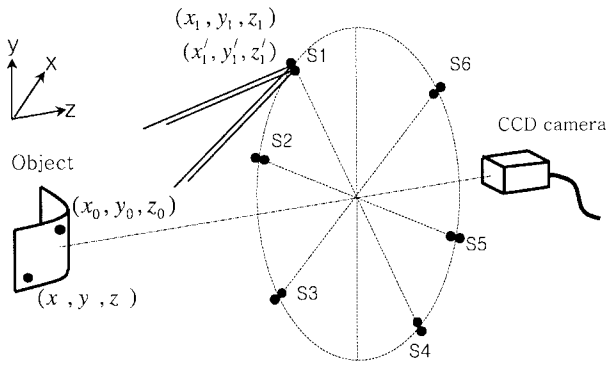


그림 3. 광산란표면 형상을 측정하기 위한 점회절 간섭계의 시스템 구성도.

는 그립 성형된 테이프(Tape) BGA(Ball Grid Array)의 윗면으로써 5×6 배열의 실리콘 칩이 한 개의 그립을 구성하고, 3개의 그립 패키지가 스테인레스스틸 외곽 프레임에 고정되어 있으며, 각각의 칩은 6×8 솔더볼 배열로 구성되어 있다. 패키지 내의 칩을 보호하기 위해 EMC(Epoxy Mold Compound)로 성형되어지는데, 이때 여러가지 성형요인에 따라 EMC의 형상이 왜곡되는 것으로 보고되고 있다. EMC표면에 형성되는 점광원부의 간섭부리는 그림 6과 같이 50×50 전 영역에 걸쳐 형성되며, 제안된 방법을 통해 형상을 복원하면 그림 7과 같다. 칩 패키지의 대각선을 따라 집축식 스타일러스인 Form Talysurf와의 비교 측정한 결과, 두 측정 결과값의 차는 그림 8과 같이 66 mm 영역에서 PV값(Peak-to-valley value) 9.8 μm, 분산값(σ) 1.9 μm를 보인다. 패턴 형성 과정(patterning process) 중에 발생하는 실리콘 웨이퍼의 휨 형상을 측정하기 위해 6인치 실리콘 웨이퍼의 뒷면 형상을 측정하였다. 웨이퍼 뒷면의 거칠기는 Ra(중심선평균거칠기)값이 25 nm로 632.8 nm의 파장광에 대해 산란되는 특징이 있으며, 웨이퍼의 크기가 증가함에 따라 공정중의 휨 형상 측정이 중요한 요소로 대두되고 있다. 칩 패키지와 동일한 과정을 거쳐 집축식 스타일러스와 동일한 구간을 측정 비교했을 때, 두 측정 결과값의 형상차이는 그림 9와 같이 PV값으로 5.6 μm이며, 분산(standard deviation)이 1.5 μm의 결과를 얻었다. 측정결과에서 나타나는 형상오차는 측정환경에 의한 외란과 점광원부의 좌표값을 결정하는 과정에서 발생한 오차에 의한 것으로 추정할 수 있다.

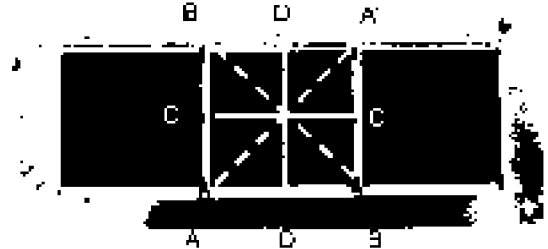


그림 5. Tape BGA 그립 볼드의 윗면 모습.



그림 6. Tape BGA 그립 볼드에 투영된 간섭부리.

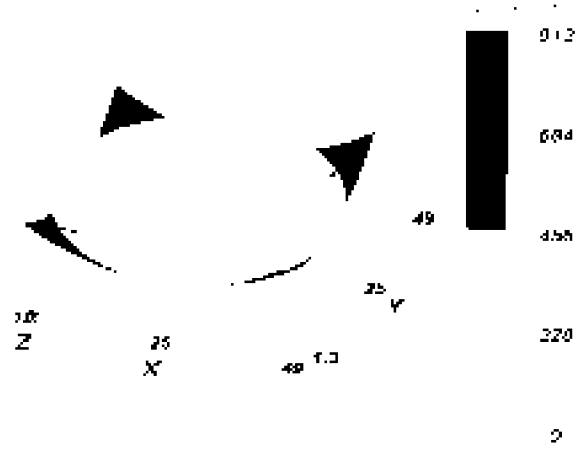


그림 7. 복원된 Tape BGA 그립 볼드의 휨형상.

### VI. 결 론

본 논문에서는 광산란 거친표면의 삼차원 형상을 고정밀로 측정하기 위해 멀티테러레이션법을 근거로 하는 6개의 점광원부로 구성된 새로운 개념의 점회절 간섭계를 제안하였다. 각 점회절 광원부는 2개의 이웃하는 광섬유로 구성되어지고, 각 끝단에서 발산하는 구면광을 공간에서 간섭시켜 공간에 위치

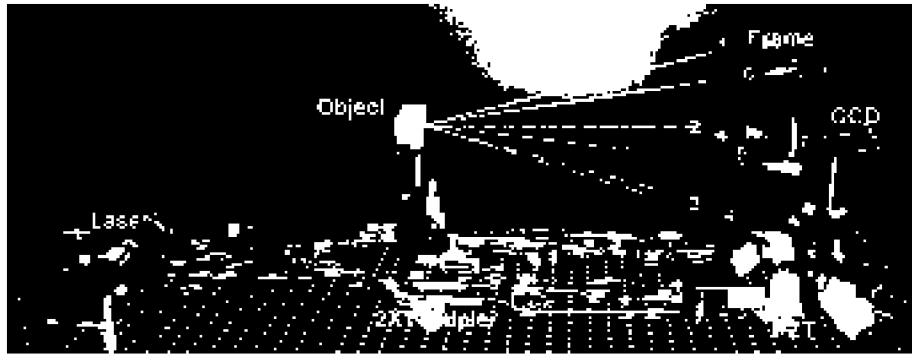


그림 4. 실제로 구현된 시스템.

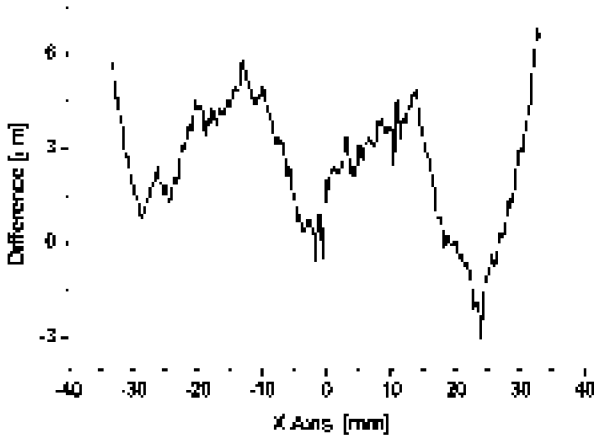


그림 8. 스타일러스와의 측정 프로파일의 차이값(칩 패키지).



그림 9. 스타일러스와의 측정 프로파일 차이값(실리콘 웨이퍼).

한 물체의 좌표정보를 획득하였다. 측정 물체표면에 형성된 간섭부너 해석을 위해서 위상천이법을 도입했으며, 이는 두 광섬유 중의 하나를 압전소자 튜브에 감고 전압을 가하여 광섬유의 길이를 강제로 연장시킴으로써 구현하였다. 각 광원부에서 생성되는 간섭부너로부터 획득된 위상값은 물체의 형상 좌

표값 결정을 위해 비선형 연립방정식으로 모델링되었으며, 해를 구하기 위해 수치해석을 적용하였다. 그룹 성형된 테일 BGA의 휨 형상과 실리콘 웨이퍼의 휨 형상을 측정하였다. 측정값의 신뢰성 검증을 위해 동일 시편을 기존의 접촉식 스타일러스와 비교 측정함으로써 66 mm 측정 영역에서 형상오차의 PV값이 5.6  $\mu\text{m}$ , 분산값( $\sigma$ ) 1.5  $\mu\text{m}$ 을 획득하였다. 이는 거친 표면의 형상을 측정하던 기존의 측정 정밀도 보다 향상된 측정 결과임을 알 수 있다.

### 참고문헌

- [1] O. Kwon, J. Wyant, and C. Hayslett, "Rough surface interferometry at 10.6  $\mu\text{m}$ ," *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 11, pp. 1862, 1980.
- [2] K. Verma and B. Han, "Warpage measurement on dielectric rough surfaces of microelectronics devices by far infrared fizeau interferometry," *J. Electron. Packaging*, vol. 122, no. 3, pp. 227, 2000.
- [3] P. J. de Groot, "Grating interferometer for flatness testing," *Opt. Lett.* vol. 21, no. 3, pp. 228, 1996.
- [4] Y. Y. Cheng and J. Wyant, "Two-wavelength phase shifting interferometry," *Appl. Opt.* Vol. 23, pp. 4539, 1984.
- [5] G. Kino, S. Chim, "The mirau correlation microscope," *Appl. Opt.* Vol. 29, pp. 3775, 1990.
- [6] A. J. den Boef, "Interferometric laser rangefinder using a frequency modulated diode laser," *Appl. Opt.* vol. 26, pp. 4545, 1987.
- [7] T. Takatsuji, M. Goto, T. Kurosawa, Y. Tanimura, and Y. Koseki, "The first measurement of a three-dimensional coordinate by use of a laser tracking interferometer system based on trilateration," *Meas. Sci. Technol.* Vol. 9, pp. 38, 1998.
- [8] B. C. Kim and S. W. Kim, "Absolute interferometer for three-dimensional profile measurement of rough surfaces," *Opt. Lett.* Vol. 28, no. 7, pp. 1, 2003.
- [9] H. G. Rhee and S. W. Kim, "Absolute distance measurement by two point diffraction interferometry," *Appl. Opt.* Vol. 41, no. 28, pp. 5921, 2002.

### Point-diffraction interferometer for 3-D profile measurement of light scattering rough surfaces

Byoung-Chang Kim<sup>†</sup>, Ho-Jae Lee and Seung-Woo Kim

*Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,  
Science Town, Daejeon 305-701, KOREA*

*<sup>†</sup>E-mail: spiggy@kaist.ac.kr*

(Received March 13, 2003, Revised manuscript September 24, 2003)

We present a new point-diffraction interferometer, which has been devised for the three-dimensional profile measurement of light scattering rough surfaces. The interferometer system has multiple sources of two-point-diffraction and a CCD camera composed of an array of two-dimensional photodetectors. Each diffraction source is an independent two-point-diffraction interferometer made of a pair of single-mode optical fibers, which are housed in a ceramic ferrule to emit two spherical wave fronts by means of diffraction at their free ends. The two spherical wave fronts then interfere with each other and subsequently generate a unique fringe pattern on the test surface. A He-Ne source provides coherent light to the two fibers through a 2×1 optical coupler, and one of the fibers is elongated by use of a piezoelectric tube to produce phase shifting. The xyz coordinates of the target surface are determined by fitting the measured phase data into a global model of multilateration. Measurement has been performed for the warpage inspection of chip scale packages (CSPs) that are tape-mounted on ball grid arrays (BGAs) and backside profile of a silicon wafer in the middle of integrated-circuit fabrication process. When a diagonal profile is measured across the wafer, the maximum discrepancy turns out to be 5.6  $\mu\text{m}$  with a standard deviation of 1.5  $\mu\text{m}$ .

OCIS Codes : 120.2650, 120.3180, 120.5050, 120.6650.