

2-Bucket 알고리즘 위상 천이 간섭계를 이용한 표면 편평도 측정

(Surface Flatness Test using 2-Bucket
Algorithm Phase-shifting Interferometry)

鄭 根 旭*, 金 東 煜**, 吉 相 瑾*, 朴 漢 奎*

(Keun Wook Jung, Dong Wook Kim, Sang Keun Gil, and Han Kyu Park)

要 約

본 논문에서는 Fizeau형 위상 천이 간섭계를 이용한 표면 편평도 측정 시스템을 설계, 구성하였다. 기존의 위상 천이 간섭계를 이용한 표면 편평도 측정에서는 간섭무늬 수가 최소한 3개 이상이어야 했다.^{[1][2]} 그러나 본 논문에서 제시한 2-Bucket 알고리즘 위상천이 간섭계는 간섭무늬 취득수를 2개로 줄여, 2개의 간섭무늬를 가지고도 충분히 표면 편평도 측정이 가능함을 알아내었다.^[3] 그러한 이유는 간섭무늬 데이터를 통해서 얻어지는 각 pixel의 위상값이 이웃하는 pixel과 밀접한 연관성을 가지기 때문이다. 본 논문에서 제시한 2-Bucket 알고리즘은 위상천이 오차 시뮬레이션에서 3-Bucket, 4-Bucket, 5-Bucket 알고리즘과 유사한 결과를 얻어냈다. 표면 편평도 측정 실험에서는 측정 대상으로 실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 실험결과, 2-Bucket 알고리즘의 peak to peak값과 rms값의 측정 결과값이 기존의 3-Bucket 이상의 알고리즘과 거의 유사함을 알 수 있었으며 앞으로 실리콘 웨이퍼나 광학 거울 등 표면의 정밀성이 요구되는 피측정물의 표면 편평도 측정에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

Abstract

In this paper, a measurement system of surface flatness test using 2-Bucket algorithm phase-shifting interferometry is designed and constructed. In the conventional surface flatness test system using phase shifting interferometry, it is needed more than 3 fringe datas^{[1][2]} but we propose 2-Bucket algorithm phase-shifting interferometry which only uses two fringe datas. 2-Bucket algorithm uses the relative phase differences of the neighbour pixels. If we watch the result of phase-shift error test simulation, 2-Bucket algorithm has the same calculating values that 3-Bucket, 4-Bucket and 5-Bucket algorithm have them. Experiments have been carried out on the silicon wafer. The measurement of silicon wafer's surface flatness shows that the flatness topography using 2-Bucket algorithm is similar to that of other algorithms.

*正會員, 延世大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Yonsei Univ.)

I. 서 론

**正會員, 金星 情報通信
(GoldStar Information Communication)
接受日字: 1992年 3月 6日

(※ 본 논문은 과학기술처 특정 연구개발사업 연구비로 이루어 졌습니다.)

고정밀 광학 기기나 반도체 웨이퍼의 경우 그 표면의 거칠기가 매우 중요한 문제로 대두되는데, 이러한 피측정 물체의 표면 거칠기를 알아내는 방법 중 광학 간섭계의 이용도가 날로 증가하고 있다.^{[1][2]}

위상 천이 간섭계는 위상 천이량에 따라 다소 변화가 심하다는 단점이 있지만 시스템 구성이 간단하고 광량의 변화에 무관한 측정을 할 수 있다는 장점이 있다. 또한 위상 천이량에 따른 변화를 없애기 위해서 PZT에서의 위상 천이 오차량에 따른 위상 보상 알고리즘 소프트웨어로 위상 오차를 줄이는 방법이 고안되었다.^{[4][5][6]}

본 논문에서는 Fizeau형 위상 천이 간섭계를 이용한 표면 편평도 측정 시스템을 구성하였다. 이는 Fizeau형 간섭계가 측정면과 기준면이 같은 경로상에 있기 때문에 외부의 영향을 줄일 수 있기 때문이다. 기존의 위상 천이 간섭계를 이용한 표면 편평도 측정에서는 간섭무늬 방정식의 미지수가 3개이기 때문에 간섭무늬 취득수는 3개 이상이어야 했다.^[7] 그러나 본 논문에서는 미지수를 하나 줄여 2개의 간섭무늬를 가지고서도 충분히 표면 편평도 측정이 가능함을 제시하였다.^[3] 실리콘 웨어퍼의 표면 편평도를 측정한 실험에서 2-Bucket 알고리즘의 peak to peak 값과 rms값의 측정 결과값이 다른 알고리즘과 같음을 알 수 있었다.

본 논문에서 제시한 2-Bucket 알고리즘을 적용하여 위상 천이량에 따른 오차의 rms값과 PZT의 구동 오차 성분에 따른 위상 오차의 rms값을 구해본 결과, 2-Bucket 알고리즘이 기존의 3-Bucket, 4-Bucket, 5-Bucket 측정 방법과 같은 결과값을 나타내며, 또한 데이터 처리량이 줄어들게 됨으로서 데이터 처리 속도가 빨라지고 그에 따른 실시간성이 향상됨을 알 수 있었다.

II. 광학 간섭계의 이론

1. 간섭계의 원리

그림 1은 Fizeau형 간섭계의 구성도이다.^[11]

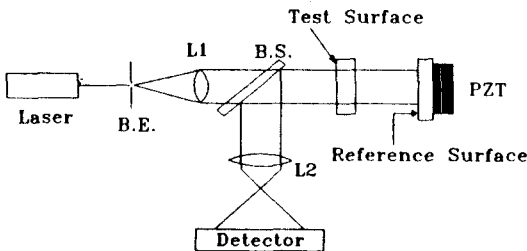


그림 1. Fizeau 간섭계
Fig. 1. Fizeau interferometry.

기준면에서 반사된 빛을 E_R , 측정면에서 반사된 빛을 E_T 라 하면

$$\begin{aligned} E_R &= E_R \exp(j\phi_R) \\ E_T &= E_T \exp(j\phi_T) \end{aligned} \tag{1}$$

관찰면에서 두 빛은 서로 결합하게 되며 광량 세기 I 는 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} I &= (E_R + E_T)(E_R + E_T)^* \\ &= E_R^2 + E_T^2 + 2E_R E_T \cos(\phi_T - \phi_R) \end{aligned} \tag{2}$$

간섭무늬에서 두 빛의 위상차 $\phi_T - \phi_R$ 는 두 면 사이의 거리차 $h(x, y)$ 에 비례한다. ϕ_R 는 상수항이므로 실제로 거리차 $h(x, y)$ 에 비례하는 식은

$$\phi_T(x, y) = 2kh(x, y) = \frac{4\pi}{\lambda} h(x, y) \tag{3}$$

k : 전파 상수
 λ : 레이저의 파장(0.6328 μ m)

그러므로 구하고자 하는 표면의 편평도 함수 $h(x, y)$ 는

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \phi_T(x, y) \tag{4}$$

로서 표면의 편평도를 정확히 구할 수가 있게 된다.^{[11][2]}

2. 위상 천이 간섭계

위상 천이 간섭계는 기준평과 물체평 사이의 상대적 위상차를 변화시킴으로써 행해지는 간섭계이다. 위상 천이가 이루어질 때마다 CCD 카메라와 같은 광검출기를 통해 간섭무늬를 받아들여 컴퓨터에 저장시킨다. 그런다음 간섭무늬 해석 소프트웨어를 통해 각 화소의 위상값을 정확히 계산하게 된다.

일반적으로 위상 천이를 시켜주는 방법으로 PZT (Piezo-electric Transducer)를 사용한다. PZT는 인가된 전압에 비례하여 팽창하는 물질이므로 이것을 기준면에 부착하여 전압을 가변시켜줌으로써 기준면에서의 위상을 변화시켜 줄 수가 있게 된다.

일반적인 간섭무늬의 식은 다음과 같다.

$$I(x, y) = I_0(x, y) \{ 1 + V(x, y) \cos \phi(x, y) \} \tag{5}$$

$I_0(x, y)$: 평균 광세기
 $\phi(x, y)$: 측정하려는 위상
 $V(x, y)$: visibility

PZT에 의해 위상을 천이시켜 주었을 때 이의 위상값

은 ϕ_r 만큼의 위상이 더해지게 되며 이 때의 간섭무늬를 $I_r(x, y)$ 라 하면 식 (5)는 식 (6)과 같이 변하게 된다.

$$I_r(x, y) = I_0(x, y) \{ 1 + V(x, y) \cos(\phi(x, y) - \phi_r) \} \quad (6)$$

$$\phi_r = (r-1) 2\pi / R, \quad r = 1, 2, 3, \dots R$$

여기서 R은 취득하는 간섭무늬의 갯수를 나타내며 식 (6)에서 미지수가 $I_0(x, y), V(x, y), \phi(x, y)$ 이므로 $R \geq 3$ 이어야 한다.

식 (6)으로 부터 위상값이 ϕ 를 구하면

$$\phi = \tan^{-1} \frac{\sum_{r=1}^R I_r \sin \phi_r}{\sum_{r=1}^R I_r \cos \phi_r} \quad (7)$$

이 된다.

III. 간섭무늬 해석

1. 2-Bucket 알고리즘

화소(pixel)당 위상값을 구하기 위해서는 최소한 3개 이상의 간섭무늬가 필요하나 화소 당 위상값은 옆 화소와 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 옆 화소와의 상대적 위상차가 중요하게 된다. 따라서 간섭무늬 취득수를 2개로 줄일 수 있으며 위상 천이량은 $\pi/2$ 이다.¹⁸⁾¹⁹⁾

간섭무늬 분포에서 화소 상호간의 관계를 그림 2에 나타내었다.



(a) $\phi_r = 0$ 일 때

(b) $\phi_r = \pi/2$ 일 때

그림 2. 화소 상호간의 연관성
Fig. 2. Relation of pixels.

각 화소에 대한 광량은 식 (8)과 같이 나타난다.

$$I_1(i) = a_i + b_i \cos(\phi_i)$$

$$I_1(i+1) = a_{i+1} + b_{i+1} \cos(\phi_{i+1})$$

$$I_2(i) = a_i + b_i \cos(\phi_i + \pi/2)$$

$$I_2(i+1) = a_{i+1} + b_{i+1} \cos(\phi_{i+1} + \pi/2) \quad (8)$$

여기서 i pixel과 i+1 pixel은 인접해 있고 a_i 와 b_i, a_{i+1}

와 b_{i+1} 광세기 변화량은 위상 변화량에 비해서 무시해도 될만큼 작으므로 $a_{i+1} \approx a_i, b_{i+1} \approx b_i$ 로 간략화시킬 수가 있게 된다. 그리고

$$\phi_i = \theta$$

$$\phi_{i+1} = \theta + \phi$$

로 가정하면 i+1 pixel과 i pixel 위상차가 ϕ 가 된다고 가정할 수 있으므로 식 (8)은 다음 식과 같이 간략하게 된다.

$$I_1(i) = a_i + b_i \cos(\theta)$$

$$I_1(i+1) = a_i + b_i \cos(\theta + \phi)$$

$$I_2(i) = a_i + b_i \cos(\theta + \pi/2)$$

$$I_2(i+1) = a_i + b_i \cos(\theta + \phi + \pi/2) \quad (9)$$

이 때 상수 성분을 없앤 $\phi(x, y)$ 는 식 (10)과 같이 구해진다.

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \frac{I_1(i+1) - I_1(i)}{I_2(i+1) - I_2(i)} \quad (10)$$

2. 위상 오차 측정

위상 오차의 발생 원인으로서는 PZT 구동시의 기준광에서의 위상 오차, 기계적 진동, 수신기의 비선형성, 광원의 불안정성 등을 들 수가 있다. 이중 PZT 구동시 기준면에서의 위상 오차가 가장 큰 원인이다.⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾

위상 천이량을 α_i 라 할 때 위상 천이 오차량은 $\delta\alpha_i$ 가 된다. 이 때 위상 천이 오차량은 식 (11)과 같은 다항식으로 주어진다.¹⁰⁾

$$\delta\alpha_i = \epsilon_1 \alpha_i + \frac{\epsilon_2}{2\pi} \alpha_i^2 + \frac{\epsilon_3}{4\pi^2} \alpha_i^3 + \dots \quad (11)$$

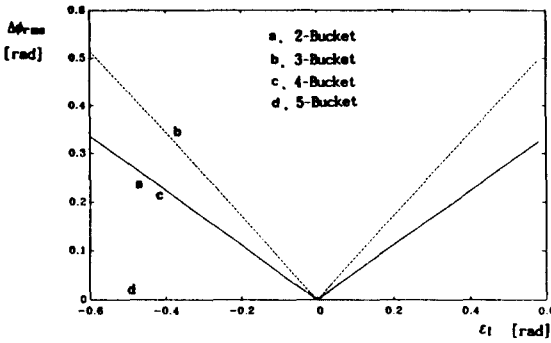
여기서 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3 \dots$ 은 PZT가 지니고 있는 오차항 상수이다.

일반적으로 N-Bucket 알고리즘의 위상 오차는 선험적으로 표현하여 다음 식과 같이 나타내어 진다.

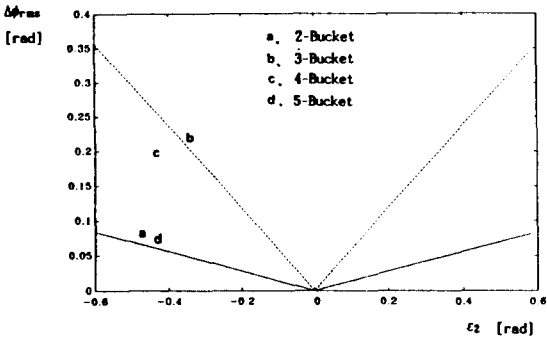
$$\delta\phi = \sum_{i=1}^N \frac{\partial\phi}{\partial I_i} \frac{\partial I_i}{\partial \alpha_i} \delta\alpha_i \quad (12)$$

그림 3은 각각의 오차항에 대한 알고리즘 상호간의 $\Delta\phi_{rms}$ 값 계산치를 비교한 것으로 2-Bucket 알고리즘이 다른 알고리즘과 유사한 특성을 가짐을 알 수가 있다.

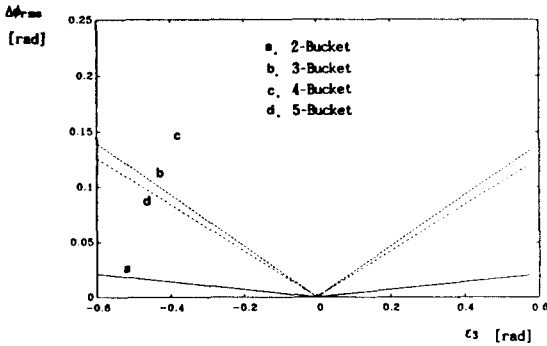
그림 4는 위상 천이량에 대한 $\Delta\phi_{rms}$ 를 나타낸 그림으로, 3-Bucket 알고리즘은 $2\pi/3$ 에서 최소값을 보이고 나머지 알고리즘은 $\pi/2$ 에서 최소값을 보인다.



(a) ϵ_1 에 대한 $\Delta\phi_{rms}$



(b) ϵ_2 에 대한 $\Delta\phi_{rms}$



(c) ϵ_3 에 대한 $\Delta\phi_{rms}$

그림 3. PZT에 의한 위상 오차항에 대한 $\Delta\phi_{rms}$ 값 비교
Fig. 3. $\Delta\phi_{rms}$ value with phase error according to PZT.

그림 5는 균등하지 않은 위상 천이량에 따른 위상 오차를 나타낸 그림이다. 여기서 위상 천이는 $\pm\delta$ 범위에서 균일한 오차 분포를 가지고 있다 가정하여 ϕ 에 대한 $\Delta\phi_{rms}$ 를 나타내었다.

3. 연속화 과정(Unwrapping)

각 화소들의 위상은 arctan 값이므로 $-\pi \sim \pi$ 사이의 값

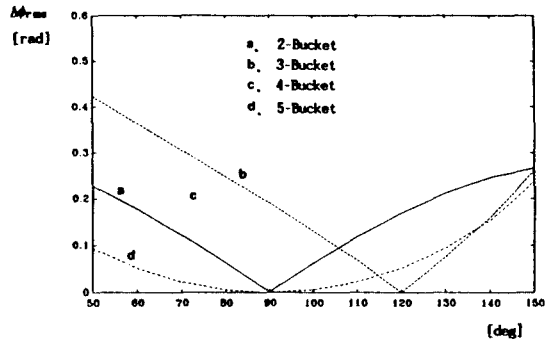


그림 4. 위상 천이량에 대한 $\Delta\phi_{rms}$ 의 그래프
Fig. 4. $\Delta\phi_{rms}$ value according to phase-shift.

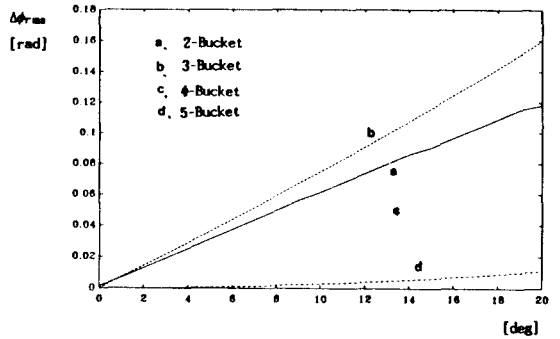


그림 5. 위상 천이의 불균일성에 대한 $\Delta\phi_{rms}$ 의 그래프
Fig. 5. $\Delta\phi_{rms}$ value according to phase-shift variation.

을 가지게 되며 따라서 이웃 화소들 사이의 위상차 $\Delta\phi$ 는 $2m\pi$ (m : 정수)에서 불연속점이 생기게 된다. 이 때 불연속점이 존재하는 위상을 $\phi_i(x, y)$ 라 하고 연속화는 $\phi_i(x, y)$ 를 불연속점이 없는 분포 $\phi_c(x, y)$ 로 만들어주기 위하여 보상 위상 $\phi_o(x, y)$ 를 더해주기나 빼주는 과정을 연속화 과정이라 한다.^[11]

$$\phi_c(x, y) = \phi_i(x, y) + \phi_o(x, y) \tag{13}$$

보상 위상 $\phi_o(x, y)$ 는 x축 방향의 보상 위상 $\phi_o^x(x, y)$ 와 y축 방향의 보상 위상 $\phi_o^y(x, y)$ 로 구성되어 있으며 각각은 식 (14)와 식 (15)으로 주어진다.

1) 모든 y점에 대하여

$$\phi_o^x(x_i, y) = \begin{cases} \phi_o^x(x_{i-1}, y) & |\Delta\phi_d(x_i, y)| < \pi \\ \phi_o^x(x_{i-1}, y) + 2\pi & \Delta\phi_d(x_i, y) \leq -\pi \\ \phi_o^x(x_{i-1}, y) - 2\pi & \Delta\phi_d(x_i, y) \geq \pi \end{cases} \tag{14}$$

2) 임의의 $x=x_L$ 에 대하여

$$\begin{aligned} \phi_o^y(x_L, y_i) &= 0 \\ \phi_o^y(x_L, y_i) &= \begin{cases} \phi_o^y(x_L, y_{i-1}) & |\Delta\phi_d(x_L, y_i)| < \pi \\ \phi_o^y(x_L, y_{i-1}) + 2\pi & \Delta\phi_d(x_L, y_i) \leq -\pi \\ \phi_o^y(x_L, y_{i-1}) - 2\pi & \Delta\phi_d(x_L, y_i) \geq \pi \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서 $\Delta\phi_d(x_i, y) = \phi_d(x_i, y) - \phi_d(x_{i-1}, y)$

$\Delta\phi_d(x_L, y_i) = \phi_d(x_L, y_i) - \phi_d(x_L, y_{i-1})$

다시 정리하면 2차원 보상 위상 $\phi_o(x, y)$ 는 다음과 같다.

$$\phi_o(x_L, y_i) = \phi_o^x(x, y) - \phi_o^x(x_L, y) + \phi_o^y(x_L, y) \quad (16)$$

그림 6은 이러한 연속화 과정을 나타낸 것이다.

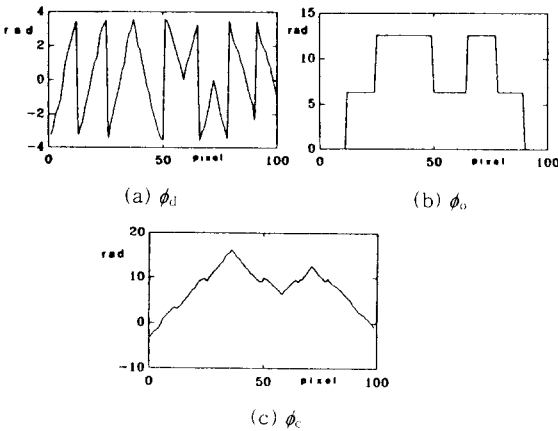


그림 6. 연속화 과정
Fig. 6. Unwrapping.

4. Zernike 방식

간섭무늬를 해석하기 위해서 광학적 파면을 표현하는 방정식이 필요한데 Zernike 방정식은 이러한 간섭무늬의 오차 성분 해석에 대해서 탁월한 해석력을 가지고 있다.

간섭무늬에 나타나는 오차 성분 중 가장 흔한 것이 기울기(tilt) 성분이다. 이러한 기울기를 제거하여 완전한 표면 편평도를 측정해야 하는데 기울기 성분 제거에 Zernike 방정식이 사용된다.

Zernike 방정식은 극좌표로 나타나며, 그 표현은 다음과 같다.^[12]

$$\left. \begin{aligned} Z_{evenj} &= 2(n+1)^{j/2} R(m, n, r) \cos(m\theta) \\ Z_{oddj} &= 2(n+1)^{j/2} R(m, n, r) \sin(m\theta) \end{aligned} \right\} m \neq 0$$

$$Z_j = (n+1)^{j/2} R(m, n, r) \quad m = 0 \quad (17)$$

여기서 $R(m, n, r)$ 는 식 (18)로 정의된다.

$$R(m, n, r) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [(n+m)/2-s]! [(n-m)/2-s]!} r^{n-2s} \quad (18)$$

여기서

- n, m : 정수
- $n \geq m$
- $n - |m|$: 짝수
- r : 반지름

이렇게 정의된 Zernike 방정식은 반지름이 1인 원위에서 직교성을 가진다.

$$\int_0^1 \int_0^{2\pi} w(r) Z_i(r) Z_j(r) r d\theta dr = \delta_{ij} \quad (19)$$

여기서

$$w(r) = \begin{cases} 1/\pi & : |r| \leq 1 \\ 0 & : |r| > 1 \end{cases}$$

위상 $\phi(x, y)$ 는 다음 식과 같이 Zernike 방정식의 선형 조합으로 나타낸다.

$$\phi_i = \sum_{j=1}^N a_j Z_j(r_i), \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (20)$$

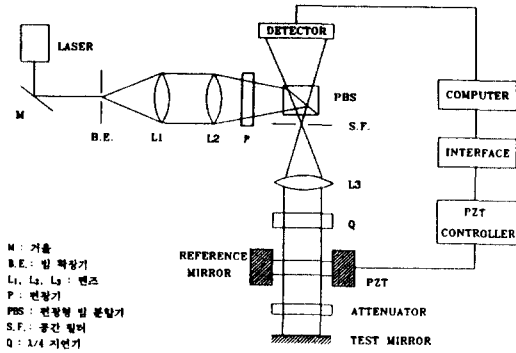
a_j : zernike 상수

IV. 표면 편평도 측정 시스템 구성 및 실험

1. 표면 편평도 측정 시스템 구성

그림 7은 Fizeau형 위상천이 간섭계의 구성도이다.

시스템은 크게 광학부, 인터페이스부, PZT 제어부, 검출부, 데이터 처리부 등으로 구성하였다. PBS는 입사 평면에 평행한 파(P파)는 통과시키고 수직인 파(S파)는 반사시키는 성질을 가졌다. 따라서 PBS를 통과한 빔이 모두 반사되기 위해서는 편광기 P를 사용하여 입사 평면에 수직하게 편광되도록 하였다.



M : 거울
 B.E. : 빔 확장기
 L1, L2, L3 : 렌즈
 P : 편광기
 PBS : 편광형 빔 분할기
 S.F. : 공간 필터
 Q : 1/4 지연기

그림 7. Fizeau 형 위상 천이 간섭계
 Fig. 7. Fizeau phase-shift interferometry.

PBS에서 반사된 빔은 공간 필터(SF : spatial filter)를 거쳐 렌즈 L₃를 통해 평행광으로 형성된다. 공간 필터는 렌즈 L₃, λ/4 지연기(quarter-wave plate), 기준면에서 반사되는 빔을 차단시키기 위해서 사용되었다.

λ/4 지연기는 선형 편광(linear polarization)된 빔이 입사하면 원형 편광(circular polarization)된 빔으로 편광 상태를 바꾸어 주고 반대로 원형 편광된 빔이 입사하면 선형 편광 상태로 바꾸어 주는 성질이 있다.

측정면에서 반사된 빔은 λ/4 지연기를 다시 통과하기 때문에 다시 이 빔이 PBS에 입사할 때는 빔의 편광 상태가 입사 평면에 평행(P파)이기 때문에 모두 투과시킨다. 본 실험에서 사용된 PZT는 Burleigh사의 모델 번호 PZ-90으로서 1000 Volt 인가에 6μm 팽창을 일으킨다. 또한, PZT에 설치된 기준면은 Melles Griot사의 제품 번호 02FQD007을 사용하였는데 이것은 표면 편평도 측정을 위하여 제작된 것으로서 λ/20 이내의 편평도를 가졌다. 그리고 이 기준의 뒷면은 내부 반사에 의한 이중 간섭이 생기지 않도록 반반사 코팅(anti-reflection coating)이 되어 있다.

2. 실험 결과 및 고찰

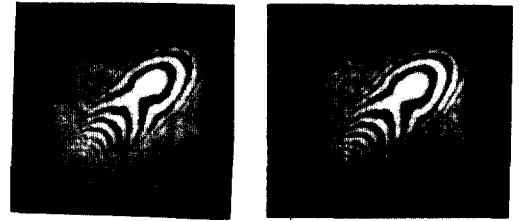
그림 7의 시스템을 이용하여 실리콘 웨이퍼의 표면 편평도를 측정하였다.

사진 1은 실리콘 웨이퍼의 간섭무늬의 형태이다.

사진 1의 간섭무늬로부터 구한 편평도는 그림 8과 같다.

그림 8(a)는 연속화 과정(Unwrapping)을 거친 후의 그림이고 그림 8(b), (c), (d), (e)는 zernike 방정식을 이용하여 기울기(tilt) 성분과 수차(astigmatism) 성분을 차례로 제거한 후의 형태를 그린 것이다.

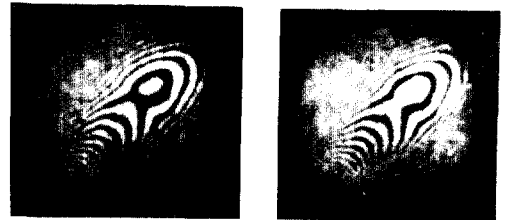
실리콘 웨이퍼의 표면 편평도를 측정한 결과를 각 알



(a) 위상 천이 φ_r=0 (b) 위상 천이 φ_r=π/2



(c) 위상 천이 φ_r=π

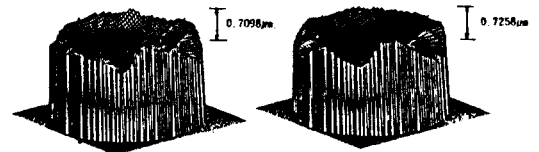


(d) 위상 천이 φ_r=3π/2 (e) 위상 천이 φ_r=2π

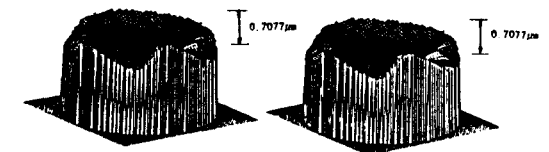
사 진 1. 실리콘 웨이퍼의 간섭무늬
 Photo 1. Fringes of silicon wafer.



(a) 연속화 후



(b) 기울기, 수차 성분을 제거한 후 (2 Bucket) (c) 기울기, 수차 성분을 제거한 후 (3 Bucket)



(d) 기울기, 수차 성분을 제거한 후 (4 Bucket) (e) 기울기, 수차 성분을 제거한 후 (5 Bucket)

그림 8. 실리콘 웨이퍼의 표면 편평도
 Fig. 8. Surface flatness of silicon wafer.

표 1. 표면 편평도에 대한 각 알고리즘 비교
Table 1. Comparison of surface flatness.

	peak to peak (μm)	rms (μm)
2-Bucket	0.7098	0.2499
3-Bucket	0.7258	0.2584
4-Bucket	0.7077	0.2499
5-Bucket	0.7077	0.2499

고리들을 비교한 것이 표 1에 주어졌다.

실리콘 웨이퍼의 표면 편평도 측정 실험에서는 2-Bucket 알고리즘, 3-Bucket 알고리즘, 4-Bucket 알고리즘, 5-Bucket 알고리즘 모두를 사용하여 비교하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 2-Bucket 알고리즘과 다른 알고리즘간의 차이점이 거의 없었으며 위상 천이 오차 시뮬레이션을 통해서 알아본 바와 같은 결과를 알 수 있었다. 그리고 2개의 간섭무늬만을 가지고서 해석이 가능한 2-Bucket 알고리즘은 간섭무늬 취득 수가 2개로써 다른 알고리즘에 비해 데이터 처리 속도가 빠르므로 처리하여야 할 피측정물이 많으면 많을수록 더욱 더 이러한 장점이 크게 부각되며, 실시간성이 향상된다는 장점을 나타낼 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 Fizeau형 2-Bucket 알고리즘 위상 천이 간섭계를 이용한 표면의 편평도 측정 실험을 하였다.

위상 천이 간섭계는 기준광과 물체광 사이의 상대적 위상차를 변화시킴으로써 행해지는 간섭계이며, 간섭무늬의 각 화소의 위상값과 빛의 세기를 CCD 카메라로 받아들이 컴퓨터를 통해 위상값을 알아내며 거리차는 위상에 비례하는 원리에 의해 표면의 편평도를 측정할 수 있었다. 또한, 위상 천이 간섭계는 화소 대 화소끼리의 빛 세기에 의한 위상의 검출 방식이기 때문에 외부의 잡음에 영향을 적게 받는다는 장점이 있다.

본 논문에서 제시한 2-Bucket 알고리즘은 열 화소끼리의 상대적 위상차를 이용하여 2개의 간섭무늬로부터 표면의 편평도를 측정해 내었으며, 다른 알고리즘과 비교하여 거의 같은 결과를 얻었고, 실시간성을 향상시키는 장점이 있었다.

실리콘 웨이퍼의 표면 편평도 측정 실험의 결과, 2-Bucket 알고리즘은 3장에서 살펴본 위상 천이 오차 시뮬레이션 결과와 같이 다른 알고리즘과 같은 결과가 얻어짐을 알 수 있었다. 그러므로 본 논문에서 제시한 2-Bucket 알고리즘이 실제로 광학 기기나 반도체 웨이퍼 측정에 이용할 수 있을 것이다.

參 考 文 獻

- [1] J. C. Wyant, "Interferometric optical metrology: basic principles and new systems", *Laser Focus*, pp. 65-71, May, 1982.
- [2] J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White, D. J. Brangaccio, "Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses", *Appl. Opt.*, vol. 13, no. 11, pp. 2693-2703, 1974.
- [3] 정근욱, 김상근, 이권연, 박한규 "Two-bucket 알고리즘을 이용한 위상 천이 간섭계", 한국 통신학회 하계 학술 발표회, 1991.
- [4] N. Ohyama, "Accuracy of phase determination with unequal reference phase shift", *J. Opt. Soc. Am(B)*, vol. 5, no. 12, pp. 2019-2025, 1988.
- [5] P. Hariharan, "Digital phase-shifting interferometry: a simple error compensating phase calculation algorithm", *Appl. Opt.*, vol. 26, no. 13, pp. 2504-2505, 1987.
- [6] J. Schwider, "Phase shifting interferometry: reference phase error reduction", *Appl. Opt.*, vol. 28, no. 18, pp. 3889-3892, 1989.
- [7] J. C. Wyant, "Phase shifter calibration in phase shifting interferometry", *Appl. Opt.*, vol. 24, no. 18, pp. 3049-3052, 1985.
- [8] F. M. Santoyo, D. Kerr, J. R. Tyrer, "Interferometric fringe analysis using a single phase step technique", *Appl. Opt.*, vol. 27, no. 21, pp. 4362-4364, 1988.
- [9] D. Kerr, F. M. Santoyo, J. R. Tyrer, "Extraction of phase data from electronic speckle pattern interferometric fringes using a single-phase-step method: a novel approach", *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 7, no. 5, pp. 820-826, 1990.
- [10] J. van Winderden, "Linear approximation for measurement errors in phase shifting interferometry", *Appl. Opt.* vol. 30, no. 19, pp. 2718-2729, 1991.
- [11] Mitsuo, Takeda, H. Ina, "Fourier transform method of fringe pattern analysis for computer-based topography and interferometry", *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 72, no. 1, 156-160, 1982.

[12] J. Y. Wang, D. E. Silva, "Wave-front interpretation with Zernike polynomials", *Appl. Opt.*, vol. 19, no. 9, pp. 1510-1518, 1980.

[13] J. Schwider, R. Burow, "Digital wave-front

measuring interferometry : some systematic error sources", *Appl. Opt.*, vol. 22, no. 21, pp. 3421-3432, 1983.

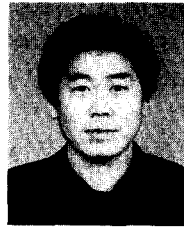
著 者 紹 介



鄭 根 旭 (正會員)

1966年 10月 30日生. 1990年 2月 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1992年 2月 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학 석사). 1992年 1月~현재 한국전자통신연구소 위성통신 기술연구단 연구원. 주관심분야는

광정보처리와 위성통신 등임.



吉 相 瑾 (正會員)

1960年 6月 27日生. 1984年 2月 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1986年 2月 연세대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학 석사). 1992年 8月 연세대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학 박사). 1992年 9月~현재 연세대학교 산업기술연구소 연구원. 주관심분야는

광정보처리, 광컴퓨팅, 광패턴인식, 간섭계 및 홀로그래피 응용 등임.



金 東 煥 (正會員)

1967年 2月 18日生. 1989年 2月 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1991年 2月 연세대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학 석사). 1991年 2月~현재 금성정보통신 안양 연구소 광통신실 연구원. 주관심분야는 차

세대 광통신 시스템, 광 컴퓨팅 방식, 광 신경 회로망, 간섭계 및 홀로그래피 응용 등임.

朴 漢 奎 (正會員) 第 26卷 第 8號 參照

현재 연세대학교 전과공학과 교수