

데이터 퓨전 기법을 이용한 헤테로다인 레이저 간섭계의 오차보정

허건행, 성욱진, 이우람, 유관호
 성균관대학교, 정보통신공학부

Error Compensation in Heterodyne Laser Interferometer using Data Fusion Method

Gunhaeng Heo, Wookjin Sung, Wooram Lee, Kwanho You
 School of Information and Communication Engineering, SungkyunKwan University

Abstract - In the semiconductor manufacturing industry, the heterodyne laser interferometer plays as an ultra-precise measurement system. However, the heterodyne laser interferometer has some unwanted environmental error which is caused from refraction in the air. This is an obstacle to improve the measurement accuracy in nanometer scale. In this paper we propose a compensation algorithm based on Data Fusion method which reduces the environmental error in the heterodyne laser interferometer. Through some experiments, we demonstrate the effectiveness of the proposed algorithm in measurement accuracy.

1. 서 론

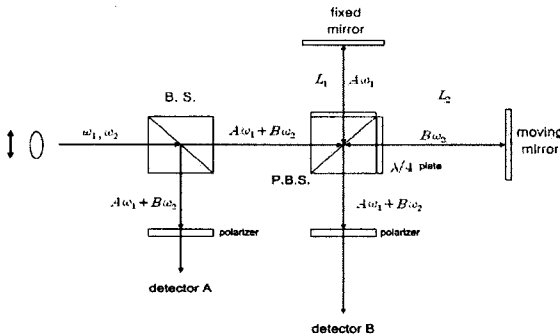
반도체 제조공정에 있어서 헤테로다인 레이저 간섭계는 초고정밀도 기반의 메트롤로지 구현을 위한 거리측정 장치이다. 헤테로다인 레이저 간섭계는 대변위 거리측정이 가능하고, 동시에 나노급의 초정밀 위치측정이 가능한 장치이다. 하지만 헤테로다인 레이저 간섭계에는 온도, 습도, 공기압, 그리고 공기섭동과 같은 환경적 오차요인과 주파수 혼합과 같은 비선형 오차요인이 존재하여 나노급의 정밀도를 유지하기가 어렵다. 따라서 레이저 간섭계의 정밀도 향상을 위해 많은 연구가 진행되었다. 대표적인 방법으로는 칼만필터(Kalman Filter)를 응용하여 정밀도를 높이는 방법[3]이 있으며, 최적화 기법을 응용한 오차보정 방법[5]도 제안되었다. 하지만 이러한 방법은 비선형 오차의 해결에만 한정되어 있다. 또한, Edlen의 보상공식을 이용한 환경적오차 보정방법[7]도 제시되었으나 일정한 보정식을 얻기가 곤란하다.

본 논문에서는, 헤테로다인 레이저 간섭계에 존재하는 환경적 오차요인을 제거하기 위하여 데이터 퓨전기법을 이용한 방법을 소개한다. 데이터 퓨전 기법에는 같은 재원을 갖는 두 개의 레이저 헤드를 이용하여 다중 데이터 값을 얻는다. 이 데이터 값들을 타원기법을 응용한 데이터 퓨전기법을 이용하여 새로운 위치로 사상하도록 하는 알고리즘을 개발하고 최종적으로 오차가 있는 위치측정의 보정값을 얻는다.

2. 본 론

2.1 이상적인 헤테로다인 레이저 간섭계

<그림 1>은 이상적인 헤테로다인 간섭계를 나타낸다. 헤테로다인 레이저 간섭계는 주파수가 다르고, 서로 직교하여 편광되는 두 개의 광원을 사용한다. 광원으로 사용되는 레이저가 편광분리기를 통과하면서 동일한 강도를 갖는 두 개의 빔으로 나누어진다. 여기서 하나는 기준신호가 되고 나머지 하나는 측정신호로 사용된다. 두 빔은 각각 고정거울과 이동거울에 맞고, 다시 편광분리기를 통해 재결합을 한 후 검출기를 통해 직접적으로 수집된다.



<그림 1> 이상적인 헤테로다인 간섭계의 구성

<그림 1>에서 이상적인 헤테로다인 간섭계의 검출기 A와 B에서

발생되는 전기장의 세기는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 E_{A1} &= (1/\sqrt{2}) A \exp[i(\omega_1 t + \Phi_A)] \\
 E_{A2} &= (1/\sqrt{2}) B \exp[i(\omega_2 t + \Phi_B)] \\
 E_{B1} &= (1/\sqrt{2}) A \exp[i(\omega_1 t + \Phi_A)] \\
 E_{B2} &= (1/\sqrt{2}) B \exp[i(\omega_2 t + \Phi_B + \Delta\Phi)]
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서, A와 B는 진폭, Φ_A 와 Φ_B 는 초기위상, 그리고 $\Delta\Phi$ 는 고정 경로와 이동 경로사이의 위상차를 나타낸다. 위 식을 이용하여, 이상적인 상태에서 검출기 A와 B에 입력되는 신호의 세기는 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 I_r &\propto (E_{A1} + E_{A2})(E_{A1} + E_{A2})^* \\
 &= \frac{1}{2} (A^2 + B^2) + AB \cos[\Delta\omega t + (\Phi_B - \Phi_A)] \\
 I_m &\propto (E_{B1} + E_{B2})(E_{B1} + E_{B2})^* \\
 &= \frac{1}{2} (A^2 + B^2) \\
 &\quad + \frac{1}{2} AB \cos[-\Delta\omega t + (\Phi_A - \Phi_B) - \Delta\Phi] \\
 &\quad + \frac{1}{2} AB \cos[\Delta\omega t + (\Phi_B - \Phi_A) + \Delta\Phi] \\
 &\quad + \frac{1}{2} (A^2 + B^2) + AB \cos[\Delta\omega t + (\Phi_B - \Phi_A) - \Delta\Phi]
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서, $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ 이다. $\Delta\Phi$ 에 관해서는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\Phi \approx \frac{4\pi n(L_2 - L_1)}{\lambda} = \frac{4\pi n\Delta L}{\lambda}
 \tag{3}$$

여기서 λ 는 ω_1 과 ω_2 의 평균 파장, n은 반사율, 그리고 ΔL 은 고정경로와 이동경로 사이의 거리차이이다. 여기서, $\Delta\Phi$ 로부터 ΔL 을 도출할 수 있음을 알 수 있다.

2.2 헤테로다인 레이저 간섭계의 환경적 오차

헤테로다인 레이저 간섭계에는 온도, 습도, 공기압, 그리고 공기섭동과 같은 환경적 오차요인이 존재한다. 그 중, 측정오차의 가장 큰 요소는 공기 굴절률에 의한 것이다. 공기 굴절률은 대기온도, 압력, 습도 및 대기밀도의 변화에 영향을 받는다. 진공에서와 달리 대기중에서는 측정오차가 발생하는 데, 대기중에서의 파장은 공기 굴절률에 따라 변하기 때문이다.

오차의 정도를 결정하는 요소는 측정공간의 대기상태 및 대기의 변화, 보상방법의 정확성이 있다. Edlen의 보상공식[7]을 이용하면 대기중의 공기 굴절률을 구할 수가 있고, 이러한 굴절률을 고려하여 오차를 보정할 수 있다. 하지만 이러한 방법은 레이저 간섭계의 제조회사에 따라 보정식이 서로 달라지게 되어 일관된 보정식을 얻기가 곤란하다. 즉, 각각의 장치별로 대기중의 온도 및 습도 등의 변화에 따른 보정테이블을 갖추고 있어야 하는 상황이 발생한다. 이는 실험환경의 온도 및 습도 등을 원하는 값으로 제어 및 유지하는 완벽한 실험환경을 필요로 하며 실제 산업현장에 적용시키기는 부적절하다.

2.3 데이터 퓨전 기법을 이용한 오차보정

본 연구에서는 공기 굴절률에 의한 측정오차를 인정하고 이러한 오차를

보정하기 위하여 새로운 방식으로 접근하고자 한다.

헤테로다인 레이저 간섭계에서 제원은 서로 같으면서 각각 다른 광원을 갖는 2 개의 레이저 헤드를 이용한다. 그리고 같은 이동물체에 대하여 서로 반대방향에서 측정된 2 개의 위치 측정값 M_1, M_2 를 얻게 되며, 이상적인 경우에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned} m_{11} + m_{21} &= m_{12} + m_{22} = \dots \\ &= m_{1l} + m_{2l} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 l 은 측정값 데이터의 개수를 의미한다. 하지만 공기 굴절률과 같은 환경적 오차요인에 의하여 실제 측정데이터 값으로는 식 (4)와 같은 관계가 성립하지 않으며, 같은 시간에 얻어지는 측정데이터일지라도 각각의 데이터의 양상은 서로 달라진다. 여기서 M_1 을 수평축(x_{m_1}), M_2 를 수직축(y_{m_2})으로 잡고 좌표평면상에 표현하면 $y_{m_2} = -x_{m_2}$ 의 직선의 주위로 넓게 퍼져있는 점들로 표현된다. 이러한 점들은 오차요인을 가지고 있는 데이터이며, 식 (4)에 의해 $y_{m_2} = -x_{m_2}$ 의 직선 주위에 근접하는 형태를 갖추어야 한다. 따라서 측정오차를 보정하기 위하여 이러한 점들을 $y_{m_2} = -x_{m_2}$ 의 직선위로 사상시켜야 한다. 여기서 어떠한 방식으로 사상시키느냐에 따라서 오차보정 정도가 달라진다. 동일한 시간동안에 측정된 M_1, M_2 의 데이터를 분석해 보면 각각의 데이터의 표준편차가 작은 데이터가 훨씬 신뢰도가 있음을 알 수 있다.

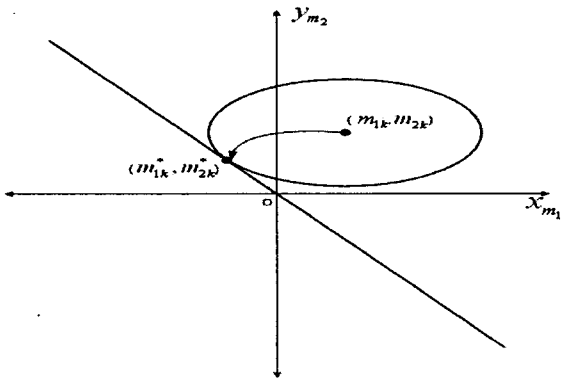
본 연구에서는 M_1, M_2 각각의 표준편차값을 장축 및 단축으로 하는 타원을 이용하여 $y_{m_2} = -x_{m_2}$ 의 직선에 사상시키는 방법을 제안한다. 여기서, 이러한 방법을 데이터 퓨전 기법이라 한다. M_1, M_2 의 표준편차값을 각각 σ_1, σ_2 라고 하고 M_1, M_2 의 각각의 데이터 (m_{1k}, m_{2k})를 타원의 중점으로 잡아서 좌표평면상에 표현한다. 그리고 이 타원의 크기를 일정한 비율로 조절하여 $y_{m_2} = -x_{m_2}$ 의 직선과의 접점을 사상점으로 한다. 식 (5)는 타원식을 의미한다.

$$\frac{(x_{m_1} - m_{1k})^2}{\sigma_1^2} + \frac{(y_{m_2} - m_{2k})^2}{\sigma_2^2} = 1, \quad (5)$$

$$k = 1, 2, \dots, l$$

여기서 m_{1k}, m_{2k} 는 두 측정 데이터값 M_1, M_2 의 같은 샘플링 순간의 값을 의미하며, x_{m_1}, y_{m_2} 는 타원의 궤적을 의미한다.

<그림 2>는 위에서 설명한 내용을 그림으로 표현한 것이다. 좌표평면상에 표현되는 모든 점들은 식 (4)에 부합되도록 새로운 점으로 옮겨진다.



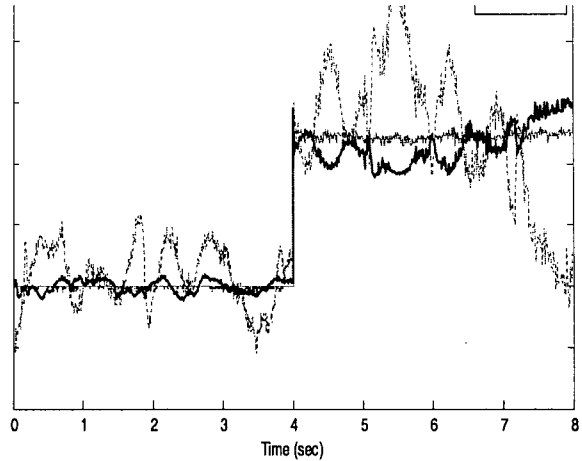
<그림 2> 타원기법을 이용한 사상방법

여기서 $y_{m_2} = -x_{m_2}$ 와 각각의 타원과의 접선이 좌표평면상의 각 점들의 사상점이 된다. 이를 M_1^*, M_2^* 라고 표현하며, 이 값들은 헤테로다인 레이저 간섭계의 위치측정 보정값이 된다.

2.4 실험결과

이 장에서는 실험을 통하여 데이터 퓨전 기법을 이용한 오차보정 알고리즘의 효과를 증명한다. 헤테로다인 레이저 간섭계의 위치측정 값과 이것을 보정한 위치측정 보정값을 비교하고 그 성능을 확인함으로써 보정 알고리즘의 우수성을 증명한다. 데이터 퓨전 기법을 이용한 오차보정 알고리즘의 보다 정확한 성능측정을 위해서 정전용량 센서를 이용한다. 정전용량 센서는 소범위 내에서 수 나노급으로

측정정확도가 아주 정밀한 장치이다. 이 장치를 통하여 얻어지는 위치측정값을 기준으로 하여 보정 전과 후를 비교하였다. 실험에서 사용된 ω_A, ω_B 의 진폭 A, B 는 1(V), 굴절률 n 은 1.00000026654516, 그리고 평균파장(λ)은 0.6329912(μm)이다.



<그림 3> 데이터 퓨전 기법을 이용한 레이저 간섭계의 오차보정

<그림 3>은 헤테로다인 레이저 간섭계의 오차보정을 위해 제안된 데이터 퓨전 기법을 적용한 결과를 나타낸 것이다. 나노 단위의 위치 이동이 가능한 압전변환기(piezo-electric transducer)를 이용하여 0nm-50nm 구간에서 계단형태로 움직이는 스테이지를 구성하고 그 위치를 측정하였다. 가는 실선은 정전용량센서(CDS), 점선은 레이저 간섭계(Laser), 그리고 굵은 실선은 레이저 간섭계의 측정값의 보정값(DF)을 의미한다. <그림 3>에서 볼 수 있듯이 제안된 보정기법을 이용하여 보정을 시작한 이후에는 위치측정 값의 정전용량센서에 의한 측정값에 근접하였다. 또한 보정값이 크게 흔들리지 않는 점을 볼 때 데이터 퓨전 기법을 이용한 오차보정 방법이 결과값을 개선하는데 큰 효과가 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

헤테로다인 레이저 간섭계를 이용하여 초정밀 위치 측정을 하려고 할 때, 대기중의 공기굴절률에 의한 오차는 가장 큰 제한요소 중 하나이다. 본 논문에서는 타원기법을 통한 사상방법을 이용한 환경오차 보정 알고리즘을 제안하였다. 그리고 서로 다른 데이터의 신뢰도를 가지고 타원의 형태를 결정하였다. 실험을 통하여 제안된 알고리즘의 성능을 평가하였으며, 실험결과 헤테로다인 레이저 간섭계의 환경오차가 효과적으로 보정되었음을 확인하였다.

<감사의 글>

본 논문은 2006년도 정부재원(교육인적자원부 학술연구 조성사업비)으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (KRF-2006-003-D00184).

[참고 문헌]

- [1] J.M. Freitas, M.A. Palyer, "Polarization effects in heterodyne interferometer," J. Mod. Opt. 42, 1875-1899, 1995.
- [2] N.Bobroff, "Residual errors in laser interferometer from air turbulence and nonlinearity," Appl. Opt. 26, 2676-2682, 1987.
- [3] T.J. Park, H.S. Choi, C.S. Han, and Y.W. Lee, "Real-time precision displacement measurement interferometer using the robust discrete time Kalman filter," Opt. Laser Tech. 37, 229-234, 2005.
- [4] T.B. Eom, J.W. Kim, and B.C. Park, "A simple method for the compensation of the nonlinearity in the heterodyne interferometer", Meas. Sci. Tech. 13, 222-225, 2002.
- [5] M.S. Hong, J.W. Jeon, K.H. Park, and K.H. You, "Adaptive nonlinearity compensation of heterodyne laser interferometer", LNAI 4252, 545-552, 2006.
- [6] M.S. Hong, "Measurement Precision Improvement for Heterodyne Laser Interferometer using Adaptive Nonlinearity Compensation", MS. Thesis, Sungkyunkwan University, 2006.
- [7] W. Tyler Estler, "High-accuracy displacement interferometry in air.", Applied Optics, Vol. 24, No 6, pp.808-815, 1985