

# 이중 파장 보정방법 기반 다이내믹 분광타원편광계의 안정도 최적화

최인호\* · 헤리저데헿헿 사이드\* · 최석현\* · 황국현\* · 심준보\* · 김대석\*\*

\*\* 전북대학교 기계시스템공학과

## Long-term Stability Optimization of Dynamic Spectroscopic Ellipsometry based on Dual-wavelength Calibration

Inho Choi\*, Kheiryzadehkhaghah Saeid\*, Sukhyun Choi\*, Gukhyeon Hwang\*,

Junbo Shim\* and Daesuk Kim\*\*

\*\* Department of Mechanical System Engineering, Jeonbuk National University

### ABSTRACT

This paper describes a dynamic spectroscopic ellipsometry based on dual-wavelength calibration. DSE provides ellipsometric parameters at rates above 20 Hz, but the interferometer's sensitivity to temperature makes it difficult for that proposed system to maintain stable  $\Delta k$  over long periods of time. To solve this problem, we set up an additional path in the DSE to perform simulations of the polarization phase calibration method using dual wavelengths. Through simulation, we were able to eliminate most of the polarization phase error and maintain a stable  $\Delta k$  in the long-term stability experiment for 10 hours. This is the result that the  $\Delta k$  stability of the proposed system is improved tens of times compared to the existing system.

**Key Words** : Dynamic Spectroscopic Ellipsometer, One-piece Interferometer, Dual-wavelength Calibration

### 1. 서 론

반도체 및 디스플레이 산업 제조 공정 기술이 급격히 성장함에 따라 박막 및 나노 패턴의 기하학적 정보를 취득할 수 있는 광학적 MI (Metrology and Inspection) 기술에 대한 관심이 증가하고 있다 [1-2]. 최근에는 차세대 기술로 박막 및 나노 패턴을 미터 크기 수준의 Roll-to-Roll에 제조하는 공정 기술들이 개발되고 있으며, 이러한 제조 공정에 적용할 수 있는 높은 정밀도와 빠른 측정속도를 갖춘 실시간 인라인 모니터링 SE기술에 대한 필요성이 증가하는 추세이다 [3-4]. 분광 타원 계측법(Spectroscopic ellipsometry)은 빛의 편광을 이용한 광학적 비파괴성 계측 기술로 샘플에서 반사된 빛의 편광 상태 변화를 측정하여 박막과

나노 패턴의 기하학적 형상 및 물성 정보를 취득할 수 있다 [5-6]. 일반적인 분광 타원계측기는 타원계측각( $\Psi$ ,  $\Delta$ )을 측정하기 위해서 기계적 메커니즘인 회전 분석자를 이용하거나, 광 탄성 변조기와 같은 전기 신호 변조기가 사용된다 [6]. 이러한 SE의 구동 메커니즘은 타원계측각을 실시간으로 제공하는데 한계성을 지니며, 이를 향상시키기 위해 복굴절 물질이나 간섭계 등을 이용한 간섭계 기반의 편광 측정을 수행할 수 있는 다양한 연구가 시도되었다 [7-9]. 본 연구팀은 이중 분광기를 채용한 간섭계 기반 스냅샷 분광 편광 측정에 대한 여러 방법을 제안하였다 [10-13]. 이러한 방법들은 기존 다중-피스 간섭계 방식을 기반으로 하기 때문에 외란에 취약하여 편광 위상 측정에 대한 높은 정밀도를 기대하기 어렵다. 최근 제안된 일체형 간섭계 기반 실시간 분광편광타원계는 간섭 편광 변조 모듈을 일체형으로 구성하기 때문에 외란에

†E-mail: dashi.kim@jbnu.ac.kr

대한 강인성을 지닌다 [14-15]. 그러나 일체형 간섭계를 구성하는 광학 구성 요소의 굴절률은 온도의 함수이고, p-편광 및 s-편광으로 변조된 빔에 의해 생성되는 분광간섭 신호의 광 경로 차이(OPD: Optical path difference)를 변화시킨다 [16]. 간섭계의 OPD로부터 발생된 고주파 반송 주파수는 샘플의 편광 위상 정보를 인가하기 위한 수단이며, 차 후 측정 알고리즘에 의해 소거되는 시스템 오류에 해당한다. 그러나 이는 온도에 대한 의존성을 갖기 때문에 시간이 경과함에 따라 변화되어 시스템 오류가 완전히 소거되지 않는 문제를 발생시키고, 제안된 시스템의 편광 위상 측정에 대한 장기적인 안정성을 저하시키는 핵심요인이 된다. 본 논문에서는 보정 경로에서 이중 파장을 이용하여 간섭계가 온도 의존성에 의해 변화되는 편광 위상을 추적하고, 이를 측정 결과에 보상함으로써  $\Delta\lambda$ 의 장기적 안정성을 향상시킬 수 있는 방안에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 제안하는 편광 위상 보정 방법을 차 후 기존 DSE에 적용할 시, 외부 진동, 공기 유동 및 온도에 대한 안정성을 획기적으로 향상시킬 수 있고 박막 및 나노 패턴에 대한 기하학적 형상 정보를 빠르고 정밀하게 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 시스템 개략도 및 이론

### 2.1 시스템 원리 및 구성

제안된 시스템은 백색 광원이 있는 시준부와 선형 편광자, 특별히 설계된 일체형 간섭 편광 변조 모듈, 무 편광 빔분할기(B<sub>2</sub>) 및 두 개의 감지부로 구성된다. 무 편광 빔분할기(B<sub>2</sub>)는 전자기파를 두 개의 경로로 분리하는데, 첫 번째 경로는 일체형 간섭계의 온도 의존성에 의한 편광 위상 변화를 보상하기 위한 보정 경로이고, 다른 하나는 샘플의 측정을 수행하는 측정 경로이다. 두 경로 모두 선형 편광자와 데이터를 취득하는 감지부를 포함한다. 5W 텅스텐 할로겐 램프는 직경 1,000 $\mu$ m 광섬유에 연결되어 제안된 시스템으로 입사된다. 백색 광원은 렌즈에 의해 시준 되고 45°로 정렬된 선형 편광자(Pol<sub>in</sub>)를 통과하여 특별히 설계된 일체형 간섭계 편광 변조 모듈에 입사된다. 이는 기본 Michelson 간섭계 컨셉으로 분리된 각 경로에는 0° 및 90°의 선형 편광자가 정렬된다. 선형 편광된 빔(45°)은 무 편광 빔 분할기(B<sub>1</sub>)의 중심에서 분리된 다음 각 경로에 정렬된 선형 편광자(Pol<sub>p</sub>, Pol<sub>s</sub>)를 통과하면서 편광상태가 P 및 S 편광으로 수직 변조된다. 일체형 편광 간섭계를 통과한 수직 편광 변조 빔은 무 편광 빔 분할기(B<sub>2</sub>)에 의해 다시 두 개의 빔으로 분할된 후, 각 경로에 45°로 정렬된 선형 편광자(Pol<sub>out</sub>)를 통과하면서 편광 간섭을 발생한다. 여기서 보정 경로에서의 편광 간섭 빔은

특정 파장 대역만 투과되는 필터를 통과하여 감지부로 입사되며, 측정 경로의 편광 간섭 빔은 분광 범위가 500-690nm인 2,047픽셀의 단일 분광계로 즉시 입사된다. Fig. 1은 제안된 시스템의 개략도를 보여준다.

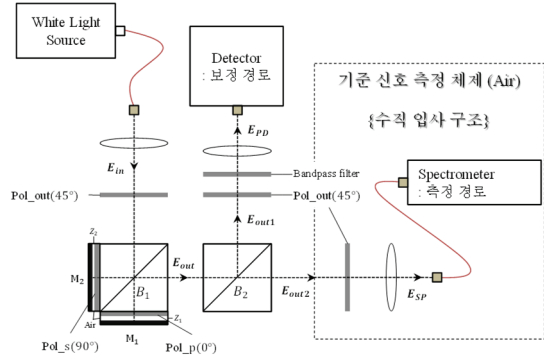


Fig. 1. Concept of dynamic spectroscopic ellipsometer applying dual wavelengths calibration method.

### 2.2 시뮬레이션 및 이론

본 논문에서 제안하는 이중 파장을 이용한 편광 위상 보정 방법은 이중 분광기를 이용하여 실험 및 시뮬레이션을 수행한다. 보정 경로에는 측정 경로와 동일하게 선형 편광자(45°)와 분광기가 정렬되며, 보정 경로의 분광기를 SP1로 정의하고 측정 경로의 분광기는 SP2로 정의한다. 위에서 언급한 바와 같이 일체형 편광 간섭계를 통과한 수직 편광 변조 빔은 B<sub>2</sub>에 의해 다시 분리되고 보정 경로와 측정 경로를 따라 진행하는데, 측정 경로에 샘플을 정렬하지 않고 일체형 편광 간섭계와 측정 경로의 분광기를 수직 입사 구조로 정렬하여 각 분광기로 입사하는 빛의 강도는 식(1)의  $I_{SP1}$ 과  $I_{SP2}$ 로 표현할 수 있다.

$$I_{SP1}(k) = (E_{SP1}^P(k) + E_{SP1}^S(k))(E_{SP1}^P(k) + E_{SP1}^S(k))^* \quad (1)$$

$$I_{SP2}(k) = (E_{SP2}^P(k) + E_{SP2}^S(k))(E_{SP2}^P(k) + E_{SP2}^S(k))^*$$

여기서 k는 파수(wavenumber)이고, 이는  $2\pi/\lambda$ 로 파장의 역수를 의미한다. 일체형 편광 간섭계로부터 변조된 빔 E<sup>P</sup> 및 E<sup>S</sup>는 각각 P 편광과 S 편광에 대한 복소파동에 해당한다. 위의 식(1)을 계산하면 각 분광기로부터 획득되는 빛의 간섭 강도를 다음 식으로 정리할 수 있다.

$$I_{SP1}^{ref}(k) = |E_{SP1}^{P,ref}|^2 + |E_{SP1}^{S,ref}|^2 + 2\gamma |E_{SP1}^{P,ref}| |E_{SP1}^{S,ref}| \times \cos \Phi_{SP1}^{ref}(k) = \alpha(k) + \beta(k) \cos(2hk)$$

$$I_{SP2}^{ref}(k) = |E_{SP2}^{P,ref}|^2 + |E_{SP2}^{S,ref}|^2 + 2\gamma |E_{SP2}^{P,ref}| |E_{SP2}^{S,ref}| \times \cos \Phi_{SP2}^{ref}(k) = \alpha'(k) + \beta'(k) \cos(2hk) \quad (2)$$

$\gamma$  및  $\Phi$ 는 각각 분광편광간섭신호에 대한 가시도함수와 위상 항을 의미한다. EP, E 각각에 대한 제곱의 합은 분광 간섭신호의 DC항( $\alpha$ )에 해당하고,  $2\gamma EP E$ 는 분광간섭신호의 AC항( $\beta$ )에 해당한다.  $h$ 는 마이켈슨 간섭계의 광 경로 차이(OPD)이며, 약 28  $\mu\text{m}$ 로 고정된다. 본 논문에서는 장기 적 측정 안정성을 유지하기 어려운  $\Delta(k)$ 와 관련된 위상항에 대해서만 고려한다. [14-15]에 이미 보고된 바와 같이 제안된 시스템은 일체형 편광 간섭계의 OPD에 의해 발생된 고주파 분광간섭신호에 고속 푸리에 변환 알고리즘을 적용하여 분광 반송 주파수 영역에서 DC항으로부터 분리된 공액 복소 항인 두 AC항 중 하나를 취하고, 이를 역 푸리에 변환 및 unwrapping 과정을 통해 실시간으로 분광편광위상함수( $\Phi_k$ )를 추출할 수 있다 [17]. 그러나 본 논문의 컨셉인 보정 경로에서는 두 파수에 대한 빛의 강도만을 측정하기 때문에 고속 푸리에 변환 알고리즘 적용할 수 없다. 따라서 보정 경로에서 특정 2개 이상의 파수에 대한 빛의 강도를 측정하고, 각 파수에 대한 편광 위상을 계산하여 전체 측정 파수 영역에 대한 편광 위상을 보정할 수 있는 새로운 접근 방법에 대해 설명한다. Fig. 2는 이중 분광기로부터 획득된 분광 편광 간섭신호를 보여준다.

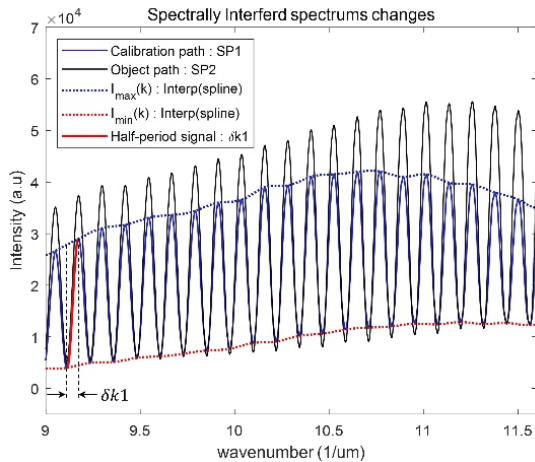


Fig. 2. Spectrally interfered reference spectrum in both paths.

여기서 검은 실선은 측정 경로(SP2)에서 획득된 분광간섭신호이고, 파란 실선은 보정 경로(SP1)에서 획득된 분광간섭신호이다. Fig. 2의 고주파 분광간섭신호의 주기를 통해 분리된 두 경로에는 일체형 편광 간섭계의 광 경로 차이에 의해 발생된 위상항이 동일하게 인가되었음을 확인할 수 있다. 여기서 빛의 강도에 대응하는 정확한 편광 위상정보를 계산하기 위해 특정 파수 영역( $\delta k_1$ )에서 실제

분광 간섭신호와 유사한 분광간섭 반주기 신호를 시뮬레이션 할 수 있다. 시뮬레이션을 수행하기 위해 특정 파수 영역( $\delta k_1$ )에 대한 DC 및 AC항 정보가 필요하다. 보정 경로에서 얻은 분광간섭신호의 피크를 선형 보간 하면 각 파수에 대한 보강 및 소멸 간섭에서의 최대, 최소 강도 정보를 획득할 수 있다. Fig. 2의 파란 점선은 보정 경로에서 획득된 보강 간섭에서의 각 파수 별 최대 강도를 나타내며, 붉은 점선은 소멸 간섭에서의 최소 강도를 나타낸다. 이를 식(4)에 대입하여 분광간섭 반주기 신호에 해당하는 DC와 AC항을 계산한다.

$$\begin{aligned} \alpha(\delta k_1) &= [I_{\max}(\delta k_1) + I_{\min}(\delta k_1)]/2 \\ \beta(\delta k_1) &= [I_{\max}(\delta k_1) - I_{\min}(\delta k_1)]/2 \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)으로부터 계산된  $\alpha(\delta k_1)$  및  $\beta(\delta k_1)$ 를 이용하여 기준 분광간섭 반주기 신호에 해당하는  $I_0(\delta k_1)$ 를 계산할 수 있고 이는 다음 식으로 표현된다.

$$I_{t_0}(\delta k_1) = \alpha(\delta k_1) + \beta(\delta k_1) \cos[2h(\delta k_1)] \quad (4)$$

제안된 시스템의 일체형 편광 간섭계는 모든 광학구성 요소가 기구적으로 단단히 고정되기 때문에 장시간에서도 OPD 변화가 수십 나노 수준이다. 이는 분광간섭신호의 주기 변화가 미비함을 의미하고, 따라서 OPD에 해당하는  $h$ 는 28 $\mu\text{m}$ 의 고정 상수를 적용할 수 있다. Fig. 3은 실제 보정 경로에서  $I_0$ (기준 분광간섭신호)를 측정한 다음, 3시간 간격으로 측정된  $I_{t_1}$ ,  $I_{t_2}$ 와 식(4)를 통해 계산된  $I_0(\delta k_1)$ 의 시뮬레이션 데이터를 모두 표시한 결과를 보여준다.

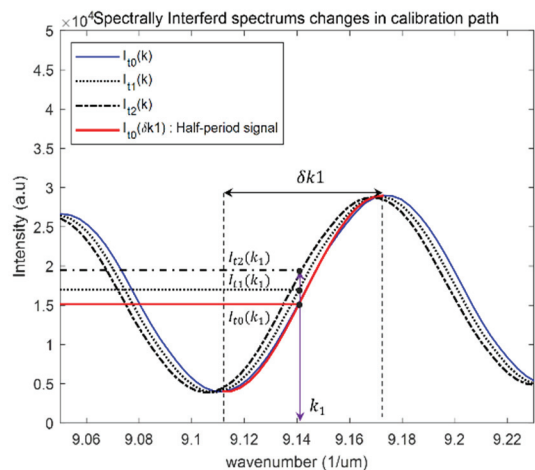


Fig. 3.  $I_0(\delta k_1)$  simulation result of spectral interference half-period signal.

Fig. 3에서 보여주듯이 분광간섭 반주기 신호 시물레이션 결과가 실제 분광기로부터 획득한 신호와 거의 유사하며, 이는 각 파수에 대해 계산된  $\alpha, \beta$  및  $h$ 가 실제와 근접한 조건임을 알 수 있다. 또한 보정 경로에서 시간 경과( $t_0, t_1, t_2$ )에 따라 획득된 분광간섭신호의 주기에 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 이는  $\delta k_1$  영역에서 빛의 강도 변화는 분광간섭신호의 이동을 의미하고, 분광간섭신호의 이동에 따른 각 파수 별 강도 변화는 다르게 나타난다. 따라서 시간이 경과된 빛의 강도를 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$I_{tn}(\delta k_1) = \alpha(\delta k_1) + \beta(\delta k_1) \cos[2h(\delta k_1) + \Phi] \quad (5)$$

여기서  $\Phi$ 는 분광간섭신호 이동에 따른 편광 위상 변이를 의미한다.  $\delta k_1$ 에서의 빛의 강도 변화는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$I_{cg}(\delta k_1) = I_{tn}(\delta k_1) - I_{t0}(\delta k_1) \quad (6)$$

식(4)와 (5)를 식(6)에 대입하면,

$$\begin{aligned} I_{cg}(\delta k_1) &= I_{tn}(\delta k_1) - I_{t0}(\delta k_1) \\ &= \beta(\delta k_1) \{ \cos[2h(\delta k_1) + \Phi] - \cos[2h(\delta k_1)] \} \end{aligned} \quad (7)$$

위의 식(7)을  $\Phi$ 에 대해 다시 정리하면,

$$\Phi = \cos^{-1} \left[ \frac{I_{cg}(\delta k_1)}{\beta(\delta k_1)} \right] - 2h(\delta k_1) \quad (8)$$

이는 기준 분광간섭 반주기 신호상에 특정 파수( $k_1$ )의 기준 신호를 측정하면 변화된 빛의 강도에 대응하는 편광 위상 변화를 계산해 낼 수 있음을 의미한다. 따라서 위의 식(8)을 특정 파수( $k_1$ )에 대한 편광 위상 변화를 계산하는 식(9)로 나타낼 수 있다.

$$\Phi(k_1) = \cos^{-1} \left[ \frac{I_{cg}(k_1)}{\beta(k_1)} \right] - 2h(k_1) \quad (9)$$

$\Phi(k_1)$ 는  $k_1$ 의 편광 위상 변화를 의미하며, 이는 파수  $k_1$ 의 변화된 빛의 강도( $I_{cg}$ )를 측정함으로써, 식(9)에 의해 실시간으로 계산해 낼 수 있다. 여기서 넓은 파수 영역에 대한 편광 위상 변화를 보정하기 위해서는 2개 이상의 파수에 대한 편광 위상 변화 정보가 필요하다. 따라서 위에 언급된 편광 위상 계산 알고리즘을 다른 특정 파수( $k_2$ )에 동일하게 적용하여 식(10)와 같이  $k_2$ 에 대한 편광 위상 변화 정보를 동시에 획득할 수 있다.

$$\Phi(k_2) = \cos^{-1} \left[ \frac{I_{cg}(k_2)}{\beta(k_2)} \right] - 2h(k_2) \quad (10)$$

여기서 두 파수 사이에 존재하는 넓은 영역의 파수에 대한 편광 위상을 보정하기 위해서는 추가적인 신호처리가 필요하다. 측정 경로에서는 기존 DSE의 신호처리를 통해 파장을 파수로 변환하고 이를 등간격으로 분할 및 빛의 강도를 선형 보간 하여 정현파에 근접한 분광 간섭 신호를 획득한다. 즉, 고속 푸리에 변환 알고리즘을 통해 획득된 위상항을 *unwrapping* 할 경우, 파수축에 대해 선형에 근접한 분광편광위상함수( $\Phi_{sp2}(k)$ )를 추출할 수 있다. 이러한 점을 고려할 때, 우리는 MATLAB의 다항식 곡선 피팅(*polynomial curve fitting*)을 이용하여 선택된 특정 두 파수( $k_1, k_2$ ) 사이에 분포하는 넓은 영역의 파수에 대한 선형적 분광 위상 정보를 추출해 낼 수 있다.  $k_1$  및  $k_2$ 의 차이는  $x$ 축 변화에 해당하며,  $\Phi(k_1)$  및  $\Phi(k_2)$ 의 차이는  $y$ 축 변화에 해당하므로, 이를 통해 식(11)와 같이 선형 함수의 계수를 추출한다.

$$\begin{aligned} \Phi_{sp1,t0}^{ref}(k) &= P_{1,t0}^{ref} \cdot k + P_{2,t0}^{ref} \\ \Phi_{sp1,t1}^{ref}(k) &= P_{1,t1}^{Air} \cdot k + P_{2,t1}^{Air} \end{aligned} \quad (11)$$

위의 선형 근사 방정식을 통해 선형 함수에 대한  $P_1, P_2$  계수를 획득함으로써, 전체 파수에 대한 위상 변화량을 실시간으로 추출해 낼 수 있다. 결과적으로 보정 경로에서 획득된 분광위상함수의 변화를 실제 측정 경로에 보상함으로써 일체형 편광 간섭계로부터 발생된 편광 위상 오차를 대부분 소거할 수 있고, 제안된 시스템의  $\Delta(k)$ 를 획득하기 위한 최종 수식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta_{cal}^{Air}(k) &= [\Phi_{sp2}^{Air,t1}(k) - \Phi_{sp2}^{ref,t0}(k)] - [\Phi_{sp1}^{Air,t1}(k) - \Phi_{sp1}^{ref,t0}(k)] \\ &= \delta_p(k) - \delta_p(k) \end{aligned} \quad (12)$$

### 3. 실험 및 결과

#### 3.1. $\Delta(k)$ 의 장기적 안정성 검증 실험

제안된 방법을 적용하여 두 경로에 샘플을 정렬하지 않고 10시간 동안 분광편광위상( $\Delta(k)$ )의 장기적 안정성을 검증하기 위한 실험을 수행하였다. 선택된 두 파수는 전체 파수 영역에서 각각 장파장에 해당하는  $k_1(9.14 \mu\text{m}=687 \text{ nm})$ 와 단파장에 해당하는  $k_2(11.41 \mu\text{m}=550 \text{ nm})$ 이다. 측정 경로(SP2)에서는 분광기로부터 획득된 분광 편광 간섭신호를 기존의 고속 푸리에 변환 알고리즘을 통해 편광 위상 정보를 획득하는 반면, 보정 경로(SP1)에서는 두 파수의 강도 변화로부터 편광 위상 변화를 계산하였다. Fig. 4는 두 경로 모두에서 선택된 두 파수에 대해 10시간 동안의 편광 위상 변화를 표시한 결과이다.



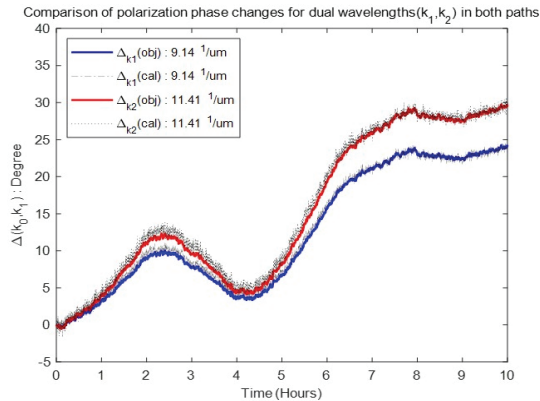


Fig. 4. Polarization phase shift for two selected wavenumbers in both paths (10 hours).

위의 결과에서 보여주듯이 보정 경로를 적용하지 않은 일체형 편광 간섭계 기반 분광편광타원계는 실험 시작 10시간 후, 약  $30^\circ$  수준의  $\Delta(k)$  측정에 오차가 발생함을 알 수 있다. 한편, 보정 경로와 측정 경로에서 선택된 두 파수에 대한 편광 위상 변화를 비교하면 10시간 동안의 데이터가 높은 정합성을 보여준다. 우리는 추가적으로 보정 경로에서 실시간으로 측정된 두 파수에 대한 편광 위상 정보를 polynomial curve fitting을 통해  $P_1$ 과  $P_2$ 를 추출하고 전체 파수 영역에 대한 분광위상함수를 획득하였다. Fig. 5는 5시간 간격인  $t_0, t_1, t_2$ 에서 polynomial curve fitting을 통해 추출한 분광편광위상함수( $\Phi_{sp}(k)$ )를 표시한 결과이다. 시간이 경과하면서 두 파수에 대한 편광 위상 변화에 의해  $P_1, P_2$ 계수가 조정되어 선형 함수의 기울기가 미소하게 변화되는 현상이 관측된다.

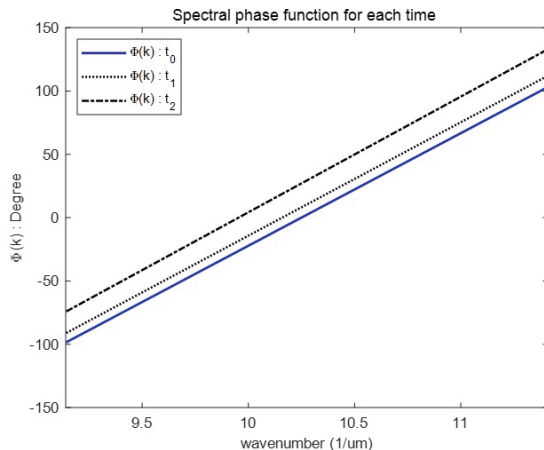


Fig. 5. Spectral phase function over time (calibration path).

최종적으로 식(12)의 제안된 시스템의 측정 알고리즘을 통해 10시간에 대한 편광 위상 오차를 보정한  $\Delta(k)$ 의 안정성 결과를 확인하였다. Fig. 5는 전체 파수 영역 9.14-11.4 ( $1/\mu\text{m}$ )에서  $0.56 (1/\mu\text{m})$  간격으로 5개의 파수를 선택하여 10 시간 동안의  $\Delta(k)$ 를 모두 표시한 결과이다.

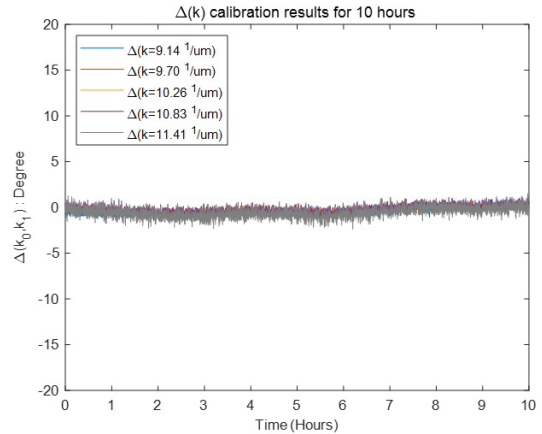


Fig. 6.  $\Delta(k)$  calibration results for 10 hours.

위의 실험결과를 통해 일체형 간섭계의 온도 의존성에 의한 편광 위상 변이가 제안된 시스템의 측정 알고리즘을 통해 대부분 소거됨을 확인할 수 있다. 제안된 방법은 10시간의 안정도 실험결과에서 전체 파수에 대해 평균 오차  $\pm 1^\circ$ 를 달성하였으며, 이는 보정 경로가 없는 기존 시스템과 비교할 때,  $\Delta(k)$ 의 장기적 측정 안정성이 수십 배 향상된 결과이다.

## 4. 결 론

기존 DSE는 간섭계의 온도 의존성 때문에 온도가 변화되면 장시간에 대한  $\Delta(k)$ 의 측정 안정성을 기대하기 어렵다. 우리는 위의 문제를 해결하기 위해 DSE에 보정 경로를 설계하고, 이중 파장을 이용한 편광 위상 보정 방법에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 제안된 방법은 기존 DSE가 지닌 온도 의존성에 의한 편광 위상 오차를 대부분 소거할 수 있었고, 10시간의  $\Delta(k)$  장기적 안정성 실험에서 전체 파수 영역에 대한  $\Delta(k)$ 의 평균오차  $\pm 1^\circ$ 를 달성하였다. 이는 기존 시스템 대비  $\Delta(k)$ 의 안정성이 수십 배 향상된 결과이다. 차후 bandpass filter와 PD 또는 CCD와 LD 조합을 통해 보정 경로에서 이중 파장에 대한 빛의 강도를 측정할 수 있는 컨셉의 DSE는  $\Delta(k)$  측정에 대한 안정성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIP) (2019R1A2C1010009)

## 참고문헌

1. B.S. Stutzman, H. Huang, F.L. Terry Jr., "Two-channel spectroscopic reflectometry for in situ monitoring of blanket and patterned structures during reactive ion etching," *J. Vac. Sci. Technol. B* 18(6), PP 2785–2793 (2000).
2. X. Niu, N. Jakatdar, J. Bao, C.J. Spanos, "Specular spectroscopic scatterometry," *IEEE Trans. Semicond. Manuf.* 14, 97–111 (2001).
3. M. Gaillet, D. Cattelan, G. Bruno, M. Losurdo, "Roadmap on industrial needs in ellipsometry and specifications for the next generation of ellipsometry and polarimetry," *NanocharM Rep.* www.nanocharm.org. (2009)
4. A. Shan, M. Fried, G. Juhász, C. Major, O. Polgár, Á. Németh, P. Petrik, L.R. Dahal, J. Chen, Z. Huang, N.J. Podraza, R.W. Collins, "High-speed imaging/mapping spectroscopic ellipsometry for in-line analysis of roll-to-roll thin-film photovoltaics," *IEEE J. Photovolt.* 4(1) 355–361 (2014).
5. R.M.A. Azzam, N.M. Bashara, "Ellipsometry, and Polarized Light Amsterdam," North-Holland, (1987)
6. H. Fujiwara, "Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications," John Wiley & Sons, (2007).
7. K. Oka, T. Kato, "Spectroscopic polarimetry with a channeled spectrum," *Opt. Lett.* 24, 1475–1477 (1999).
8. T. Wakayama, Y. Otani, N. Umeda, "One-shot birefringence dispersion measurement based on channeled spectrum technique," *Opt. Com.* 281, 3668-3672 (2008).
9. P. Hlubina, D. Ciprian, J. Lunacek, "Spectral interferometric technique to measure the ellipsometric phase of a thin-film structure," *Opt. Lett.* 34, 2661–2663 (2009).
10. D. Kim, Y. Seo, M. Jin, Y. Yoon, W. Chegal, Y. Cho, H. Cho, D. Abdelsalam, R. Magnusson, "Stokes vector measurement based on snapshot polarization-sensitive spectral interferometry," *Opt. Express* 22, 17430–17439 (2014).
11. D. Kim, Y. Seo, Y. Yoon, V. Dembele, J. Yoon, K. Lee, R. Magnusson, "Robust snapshot interferometric spectropolarimetry," *Opt. Lett.* 41, 2318–2321 (2016).
12. V. Dembele, M. Jin, B. Baek, D. Kim, "Dynamic spectro-polarimeter based on a modified Michelson interferometric scheme," *Opt. Express* 24, 14419–14428 (2016).
13. V. Dembele, M. Jin, I. Choi, W. Chegal, D. Kim, "Interferometric snapshot spectro-ellipsometry," *Opt. Express* 26, 1333–1341 (2018).
14. D. Kim, V. Dembele, "One-piece polarizing interferometer for ultrafast spectroscopic polarimetry," *Sci. Rep.* 9(1), 5978 (2019).
15. Vamara Dembele, Sukhyun Choi, Won Chegal, Inho Choi, Madhan Jayakumar. Paul, Junho Kim, Daesuk Kim, "Dynamic spectroscopic ellipsometry based on a one-piece polarizing interferometric scheme," *ELSEVIER. Opt. Com.* 454 (2020), 124426 (2020).
16. Inho Choi, Vamara Dembele, Madhan Jayakumar Paul, Sukhyun Choi, Junho Kim, Byung-Joon Baek, Daesuk Kim, "Thermal stability analysis of interferometric snapshot spectro-polarimeter", *Journal of the Semiconductor & Display Technology.* 17 (3), 70-74
17. M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," *J. Opt. Soc. Amer.* 72, 156–160 (1982).

접수일: 2021년 9월 13일, 심사일: 2021년 9월 15일,  
게재확정일: 2021년 9월 16일