

# 일체형 분광편광간섭모듈 기반 분광타원편광계의 정확도 향상

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

\*\* 전북대학교 기계시스템공학과

## Accuracy Enhancement of Dynamic Spectroscopic Polarimetry

Gukhyeon Hwang\*, Junbo Shim\*, Inho Choi\*, Sukhyun Choi\*,  
Saeid Kheiryzadehkhaghah\* and Daesuk Kim\*\*

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

### ABSTRACT

We describe an optimal alignment method for improving accuracy of dynamic spectroscopic polarimeter based on monolithic polarizing interferometer. The dynamic spectroscopic polarimeter enables real-time measurements of spectral ellipsometric parameters by using a spectral carrier frequency concept. However, the non-polarizing beam splitter used in the monolithic polarizing interferometer cannot maintain the polarization state perfectly due to phase retardation caused by optical anisotropic characteristics of the non-polarizing beam splitter, resulting in degraded measurement accuracy. The effect of the beam splitter can be minimized through optimal alignment of the polarizers used in the polarizing interferometer and the analyzer. We demonstrate how much the proposed alignment method can enhance the measurement accuracy by comparing with previous alignment approach.

**Key Words** : Spectroscopic Polarimetry, Monolithic Polarizing Interferometer, Beam Splitter, Dielectric Coating

### 1. 서 론

최근 반도체 제조공정의 고집적도 추세에 따라 나노스케일 박막 및 패턴 측정에 대한 다양한 고속·고정밀 계측 솔루션이 제안되고 있다 [1,2]. 특히 측정 대상의 전 처리 및 손상 없이 측정 가능한 광학적 계측방식에 대한 관심이 증대되고 있으며 그 중 분광 타원계측법(Spectroscopic ellipsometry, SE)은 시편에서 반사된 빛의 편광상태 변화를 통해 3차원 기하학적 정보를 취득하는 대표적 광학 계측 도구이다 [3,4]. 분광 타원계측법에서 측정하는  $\Psi(\lambda)$ 와  $\Delta(\lambda)$ 는 빛의 편광상태를 대표하는 분광 매개변수로서 각각 P파와 S파의 진폭 비와 위상 차를 나타낸다. 일반적으로 분광 매개변수 측정은 구동부의 기계적·전기적 회전이

요구된다. 특히 기계적 구동부 회전방식의 SE는 초 단위 이상의 측정시간이 요구되며 고정밀 분광 타원매개변수 측정을 위한 고가의 정밀 모터 및 복잡한 메커니즘이 요구된다. 한편 많은 연구팀에서는 새로운 방식의 계측 솔루션을 제안해왔으며 대표적으로 다중채널 모듈 방식 [5-7], 두꺼운 복굴절 위상 지연자 [8-10], 일체형 편광간섭계 [11-13] 기반의 고속 분광 타원매개변수 측정방식 있다.

실시간 분광 타원편광계(Dynamic spectroscopic polarimeter, DSP)는 일체형 편광간섭계에 기반한 P파와 S파의 고주파 분광간섭신호의 고속 푸리에 변환을 통해 분광 타원매개변수 고속 측정이 가능한 고속 스냅샷 측정 방식이다 [11]. 또한 온도변화에 의한 시스템 불안정성을 추가 보상채널을 통해 극적으로 개선하였다 [13]. 하지만 일체형 간섭계에 사용되는 무편광 빔스플리터는 빔 분할을 위해 일정 두께의 유전 코팅(Dielectric coating)이 증착되어 있다. 따라

†E-mail: dashi.kim@jbnu.ac.kr

서 이러한 유전 코팅에 비스듬하게 입사되는 P파와 S파의 프레넬 계수를 변화시키기 때문에 무편광 빔스플리터 입사 빛의 편광상태가 반사 및 투과에서 유지되지 않는 문제가 있다 [14]. 그 결과 일체형 편광간섭계의 각 경로에서 진행하는 빛의 편광상태는 순수한 P파와 S파가 아닌 각 경로에 대해 미소한 수직방향 복소 편광성분이 포함된 간섭신호가 생성되기 때문에  $\Delta(\lambda)$  측정 정확도가 저하되는 문제가 발생한다. 그러나 일체형 편광간섭계에 정렬된  $0^\circ$ 와  $90^\circ$  편광자 및 측정부의 검광자의 편광 축 정렬 상태에 따라 시료 측정 시 나타나는 경향을 통해 정확도 높은 측정 결과를 획득하였다. 본 논문에서는 이러한 시스템 정렬상태에 따른 측정오차 경향을 분석하고 이를 통해  $\Delta(\lambda)$  측정 정확도 향상을 위한 비용 효율적이고 간편한 최적의 정렬방법을 제안한다.

## 2. 시스템 원리 및 정확도 향상방안

### 2.1 실시간 분광 타원편광계 구성

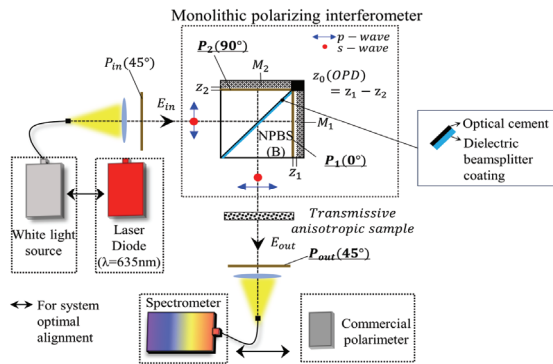


Fig. 1. Schematic of dynamic spectroscopic polarimeter.

실시간 분광 타원편광계는 백색 광원, 시준부, 일체형 편광간섭계, 측정부와 분광기로 구성된다.  $1000\mu\text{m}$  광 파이버에 연결된 20W 텅스텐-할로겐 광원은 구면렌즈 ( $F=100\text{mm}$ )에 의해 시준되며  $45^\circ$ 로 정렬된 편광자( $P_{in}$ )를 지나 일체형 편광간섭계에 입사된다. 일체형 편광간섭계는 무편광 빔스플리터(B),  $0^\circ/90^\circ$  선형 편광자( $P_1, P_2$ ), 두 평행거울( $M_1, M_2$ )이 기구적으로 단단하게 고정된 마이켈슨 간섭계 개념의 편광 변조 모듈로 서로 수직방향의 두 복소 파동이 생성된다.  $z_1$ 과  $z_2$ 는 각각 간섭계 각 경로의  $M_1$  및  $M_2$ 와 B까지의 거리를 의미한다. 두 파동의 고주파 분광 반송주파수를 생성하기 위해 광 경로 차( $z_0=z_1-z_2$ )는 약  $50\mu\text{m}$ 로 정밀하게 On-axis로 정렬된다. 편광 간섭계 이후 측정 시료를 투과한 두 파동은  $45^\circ$  선형 편광자( $P_{out}$ )를 지

나 동일한 방위각의 편광상태로 분광기( $590\text{nm}-680\text{nm}$ ,  $3648\text{pixel}$ )에 입사된다. Figure 1에 도시된 레이저 다이오드 (Laser diode, LD)와 상용 편광계측기(Commercial polarimeter)는 시스템 최적 정렬 시 사용하며, 정렬 프로세스에 대한 자세한 설명은 2.3장에서 다루겠다.

### 2.2 $\Delta(\lambda)$ 측정 원리 및 정확도 저하 이유

실시간 분광 타원편광계 시스템의 일체형 편광간섭계의 각 경로에 고정된 평행거울  $M_1$ 과  $M_2$ 를 지나는 복소 파동을 각각  $E_1$ 과  $E_2$ 로 정의하며, 식(1)은 시료(O)를 투과한 두 복소 파동을 존스 행렬로 표현한 것이다 [11].

$$E_1(\lambda) = OBPM_1P_1BP_{in}E_{in}(\lambda) = \begin{bmatrix} u'(\lambda)e^{j[2kz_1+\xi'(\lambda)+\delta_p(\lambda)]} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$E_2(\lambda) = OBPM_2P_2BP_{in}E_{in}(\lambda) = \begin{bmatrix} 0 \\ v'(\lambda)e^{j[2kz_2+\eta'(\lambda)+\delta_s(\lambda)]} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Where,

$$O = \begin{bmatrix} |t_p(k)| \exp\{i\delta_p(k)\} & 0 \\ 0 & |t_s(k)| \exp\{i\delta_s(k)\} \end{bmatrix}$$

여기서  $k$ 는 파수(Wavenumber,  $k=2\pi/\lambda$ )를 의미하며,  $j$ 는 복소수는 의미하며  $j^2=-1$ 이다. 또한,  $u', v'$ 와  $\xi, \eta'$ 는  $E_1$ 과  $E_2$ 의 진폭과 위상을 나타내는 미지변수이다.  $t_p$ 와  $\delta_p$ ,  $t_s$ 와  $\delta_s$ 는 시료 투과 후 두 파동의 진폭과 위상 변화 항을 나타내며, 분광 타원매개변수는 각각  $\Psi(k)=t_p/t_s$ ,  $\Delta(k)=\delta_p-\delta_s$ 이다. 두 파동의 간섭신호는 Fig 2(a)와 같이 분광기에서 관측되며, 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

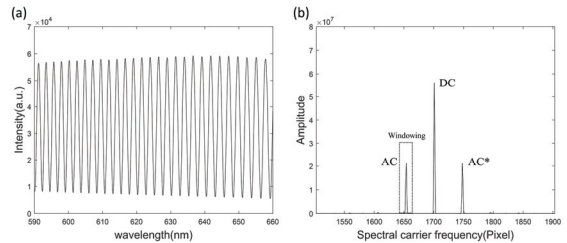


Fig. 2. (a) Spectral interference signal, (b) Spectral frequency domain data after FFT.

$$I^{Obj}(k) = (E_1(k) + E_2(k))(E_1(k) + E_2(k))^* = (|E_1(k)||t_p|^2 + |E_2(k)||t_s|^2 + 2\gamma|E_1(k)||E_2(k)||t_p||t_s|\cos\Phi^{Obj}(k)) \quad (2)$$

Where,

$$\Phi^{Obj}(k) = 2kz_0 + [\xi'(k) - \eta'(k)] + \Delta(k)$$

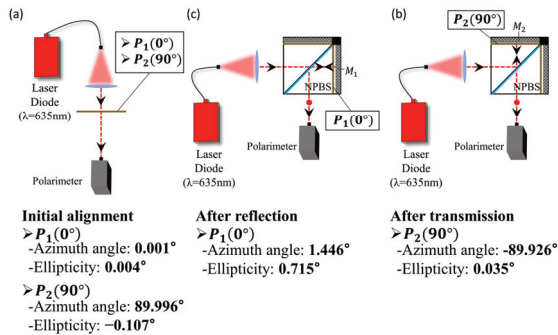
$\Phi^{Obj}(k)$ 는 측정 시료 투과 후 편광 위상함수로 고주파 분광간섭신호에 고속 푸리에 변환을 적용하여 획득한 Fig. 2(b)와 같은 주파수 공간에서 두 복소 공역 중 하나의 AC 항에 대해 역 푸리에 변환을 통해 획득 가능하다 [15]. 여기서 식(3)과 같이  $\Delta(k)$  정보만을 추출하기 위해서는 측정 시료 없이 Air만을 통과한 간섭신호에서 추출한  $\Phi^{Ref}(\lambda)$ 로 불필요한 미지변수를 소개하는 사전작업이 필요하다.

$$\Delta(k) = \Phi^{Obj}(k) - \Phi^{Ref}(k) \quad (3)$$

Where,

$$\Phi^{Ref}(k) = 2kz_0 + [\xi'(k) - \eta'(k)]$$

하지만 일체형 간섭계에 사용되는 무편광 빔스플리터는 두개의 직각 삼각형 유리 큐브 사이에 일정 비율의 분할(5:5)에 알맞은 두개의 유전 코팅(Dielectric beam splitter coating)이 증착되어 광학 본드로 접착된 형태로, 코팅에 비스듬하게 입사된 후 반사 및 투과되는 출력 빛은 P파와 S파의 프레넬 계수(Fresnel coefficient)를 변화시키기 때문에 위상지연이 발생한다 [14]. 따라서 입사 빛의 편광상태를 보존할 수 없는 물질의 광학적 특성으로 인해 일체형 편광 간섭계의 각 경로에 정렬된 0°와 90° 편광자를 통과한 빛은 무편광 빔스플리터를 통과하며 편광상태가 변화한다.



**Fig. 3.** Polarization state (azimuth angle/ellipticity) change (a) before and (b) after reflection and (c) transmission in NPBS.

Fig. 3은 무편광 빔스플리터의 투과 및 반사에서 편광상태 변화를 보여준다. 편광자가 Fig. 3(a)와 같이 편광자의 초기 정렬상태에서 관측된 편광상태는 방위각(Azimuth angle)과 타원율(Ellipticity)이 각각 0.001°/0.004°, 89.996°/0.107°이지만, 반사(Fig. 3(b)) 및 투과(Fig. 3(c)) 후 빛의 편광상태가

각각 1.446°/0.715°, -89.926°/0.035°로 미소한 변화가 발생하였다. 이는 일체형 편광간섭계의 각 경로에서 생성되는 빛의 편광상태는 순수한 P와 S방향의 선형편광이 아닌 무편광 빔스플리터에 의한 미소한 수직방향의 복소 성분이 생성되었음을 의미한다. 식(4) 이방성 물질( $O^{Aniso}$ )에 대한 일반적인 존스 행렬 표현이며, 광축에 따라 위상지연이 다르게 발생하므로 회전 변환 행렬이 존재한다. 따라서 이방성 시료 측정 시 비대각성분이 무편광 빔스플리터에 의한 미소 편광성분과 곱해지기 때문에 추가 위상 에러 발생으로 측정 정확도가 저하된다.

$$O^{Aniso} = R(-\theta)OR(\theta) \quad (4)$$

Where,

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, R : \text{Rotation matrix}$$

### 2.3 $\Delta(\lambda)$ 측정 정확도 향상 방안

일체형 편광간섭계 출력빔의 편광상태 변화는 추가 위상 에러 항을 발생시키기 때문에 무편광 빔스플리터에 의한 위상지연 현상을 나타내는 편광상태 지표인 타원율이 최소가 되는 편광자 정렬을 통해 정확도 개선이 가능하다. 각 경로에서 무편광 빔스플리터를 통과한 빛의 편광상태 관측을 위해서 Fig. 1(b)와 같이 상용 편광계측기 (Thorlabs Polarimeter, PAX5720VIS-T)를 장착하고 백색광원용 LD(λ=635nm)로 변경한다.

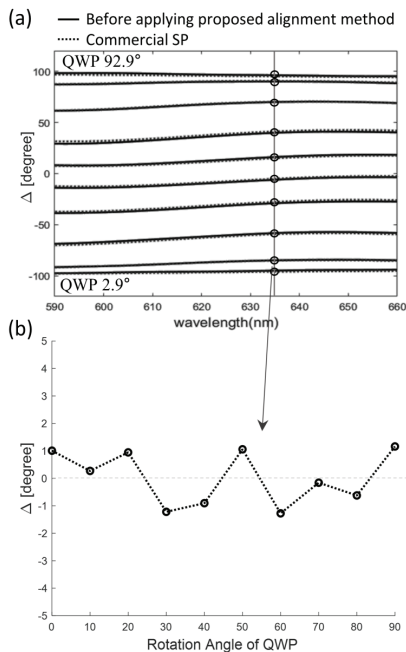
첫번째 과정으로 일체형 편광간섭계의  $P_2$  경로를 차단하고 상용 편광계측기를 통해  $P_1$  경로에서 출력되는 편광상태의 타원율이 최소인 방위각에 정렬하고 이를  $P_1'$ 으로 정의한다. 그 다음  $P_1$  경로를 차단하고  $P_2$ 를  $P_1'$ 와 수직인 방위각( $90^\circ + P_1'$ )에 정렬한다. 마찬가지로  $P_{out}$ 은  $P_1'$ 과  $P_2'$ 의 중간각도인  $45^\circ + P_1'$ 에 정렬하고 QWP 측정 및 상용 SP의 결과와 비교한다. 여기서  $P_2'$ 을  $P_1'$ 과 수직 부분에서 정밀 조정하며 QWP slow-axis 0°, 90°에서 DSP 측정값과 상용SP의 측정값 간 MSE(Mean square error, 평균제곱오차)가 최소인  $P_2$  각도를  $P_2'$ 으로 정의한다. 이때 앞에서 타원율이 최소가 되는  $P_1'$ 을 기준으로  $P_2$  및  $P_{out}$ 을 새롭게 정렬하였기 때문에 전체 시스템이  $P_1'$ 만큼 틀어져 있는 형태로 볼 수 있다. 따라서 QWP측정은 상용 SP의 QWP측정포인트보다  $P_1'$ 만큼 틀어진 각도로 측정해야 한다. 3장의 정렬과정과 측정결과는 이러한 부분이 모두 고려된 측정 결과이다.

마지막으로 앞서 재정렬된  $P_{out}(45^\circ + P_1')$  부근에서 QWP 및 상용SP의 결과와 비교하며  $P_{out}$ 을 미세 조정한다. QWP는 비대각성분이 0이 아닌 지점 slow-axis 30°, 50°를 측정하며 상용 SP의 측정결과와 MSE가 최소인  $P_{out}$ 각도를 새롭게

계 정렬하고  $P_{out}$ 로 정의한다. 여기서 동일한 제품의 무편광 빔스플리터라도 제조공정 오차에 의해 유전 코팅의 두께가 완벽히 동일하지 않기 때문에 최적 정렬된  $P_1, P_2$  및  $P_{out}$  각도는 모든 일체형 편광간섭계 기반 측정 시스템에서 적용되지 않으며, 제안한 최적 정렬방법을 다시 적용해야 함을 주의한다.

### 3. $\Delta(\lambda)$ 측정 정확도 검증 실험

본 장에서는 앞서 제안한 정확도 향상방안 적용 전·후 시료 측정 실험결과를 보여준다. 또한 상용 SP 측정결과 ( $\Delta_{SP}$ )와 DSP( $\Delta_{DSP}$ )의 전체 측정 파장영역(N개 픽셀)에 대한  $\Delta(\lambda)$  MSE 평균값( $\sum(\Delta_{DSP}-\Delta_{SP})/N$ )을 통해 정량적인 정확도 개선 결과를 보여준다. 측정 시료는 QWP를 사용하였으며 Slow-axis 기준으로  $0^\circ(+P_1)$ 에서  $90^\circ(+P_1)$ 까지  $10^\circ$  간격으로 총 10개 포인트를 측정하였다.

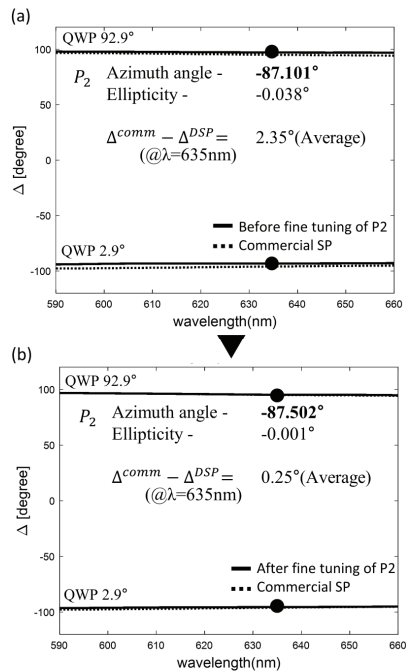


**Fig 4.** (a) QWP measurement results and (b) difference of  $\Delta(\lambda=635\text{nm})$  between DSP(solid line) with previous alignment method and commercial SP(dotted line).

Fig 4(a)는 QWP의  $\Delta(\lambda)$  측정 결과로, 실선은 제안한 방안 적용 전 DSP와 점선은 상용 SP 나타낸다. Figure 4(b)는 QWP 측정 각도에 대한 635nm파장에서 차이( $\Delta^{comm}-\Delta^{DSP}$ )를 나타내며 평균 약  $0.86^\circ$ 의 오차가 발생한다. 전체 파장에 대해서는 평균 MSE  $1.06^\circ$ 의 오차를 보여줌으로써 무편

광 빔스플리터에 의한 추가 위상 에러 항 발생으로 인해 무시할 수 없는 오차를 보인다.

먼저  $\Delta(\lambda)$  측정 정확도 향상을 위한 정렬 과정으로 상용 편광계측기를 이용하여  $P_1$ 을 타원율 최소 지점 (방위각:  $2.9^\circ(=P_1)$ , 타원율:  $0^\circ$ )에 정렬하였다. 그 다음  $P_2$ 를 새로 정렬된  $P_1$ 각도 기준으로 수직 부분인  $-87.1^\circ$ 로 정렬하였으며,  $P_{out}$ 은  $45+P_1$ 지점인  $47.9^\circ$ 에 정렬하고 QWP slow-axis  $0^\circ, 90^\circ$ 를 측정하였다.  $P_2$  정밀 정렬 전 Fig 5(a)와 같이 상용장비와 약  $2.35^\circ$ 의 차이가 발생하였으나, 방위각이  $87.5^\circ$ 일 때 Fig 5(b)와 같이 상용장비 측정결과와  $0.25^\circ(@\lambda=635\text{nm})$  차이로 적합성 높은 결과를 보이므로 해당 방위각을  $P_2$ 으로 선택한다.



**Fig. 5.** QWP slow axis  $0^\circ$  and  $90^\circ$  measurement results (a) before and (b) after fine-tuning of  $P_2$ .

QWP fast-axis와 slow-axis에 평행한 편광방향으로 진동하는 선형편광은 비대각 성분의 영향을 받지 않기 때문에 비대각 성분이 0이 아닌 QWP각도(Slow-axis $\neq 0^\circ, 90^\circ$ )에서의 측정 정확도 확인이 필요하다. 따라서 Fig 6과 같이 QWP slow-axis  $30^\circ, 50^\circ$  측정을 실시하였다. Figure 6(a)는  $P_{out}$  미세 조정 전  $47.9^\circ$ 에서의 측정 결과를 보여주며 635nm 파장에서 상용장비와 평균 약  $1.45^\circ$ 의 오차를 보였다. Figure 6(b)는 미세 조정 후 결과로  $P_{out}$ 의 방위각이  $45.8^\circ$ 에서 635nm파장 기준 상용장비와 약  $1^\circ$ 의 차이로 이전보다 개선된 결과를 얻을 수 있었다.

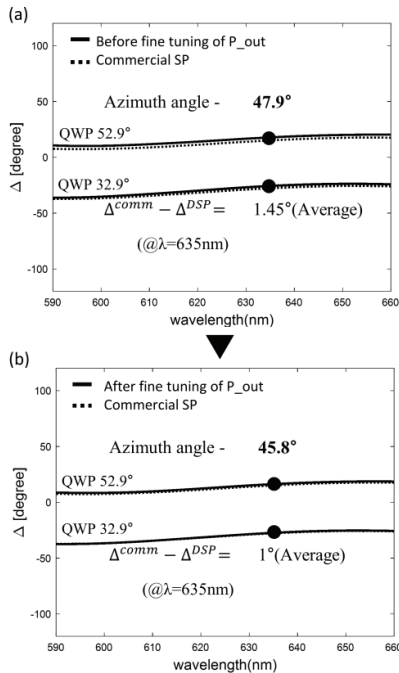


Fig. 6. QWP slow axis 30° and 50° measurement results (a) before and (b) after fine-tuning of  $P_{out}$ .

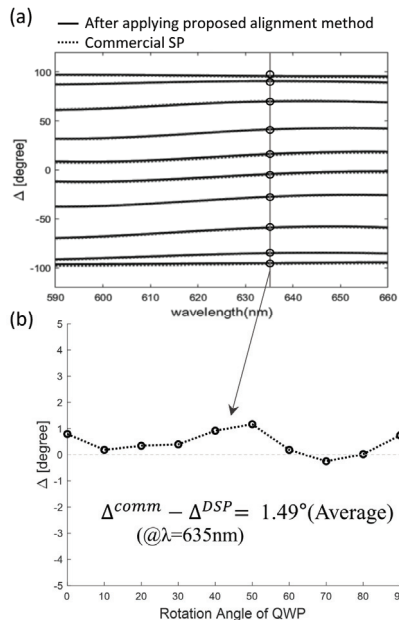


Fig. 7. (a) QWP measurement results and (b) difference of  $\Delta(\lambda=635\text{nm})$  between DSP (solid line) with proposed alignment method and commercial SP (dotted line).

Fig 7(a)는 제안된 방안 적용 이후 DSP와 상용 SP의 QWP Slow-axis 0°~ 90°를 10° 간격으로 측정된 결과이다. 제안한 방안 적용 후 Fig 7(b)와 같이  $P_1'=2.9^\circ$ ,  $P_2'=87.502^\circ$ ,  $P_{out}'=45.8^\circ$ 에서 모든 파장 및 측정 포인트에 대해 MSE 0.45°의 결과를 얻을 수 있었다. 이는 이전 정렬방법 정확도 수준 MSE 1.06° 대비 약 2.3배 개선된 결과이다. 따라서 본 제안된 정렬방법은 고가의 광학계 없이 단순한 편광자 정렬만으로 고정확도 실시간 분광 타원편광계의 제작 가능성을 보여준다.

#### 4. 결론

실시간 분광 타원편광계는 고주파 분광 반송주파수를 통한 타원 매개변수의 고정밀 고속 측정이 가능하지만 상용 장비 대비  $\Delta(\lambda)$  측정 정확도가 부족한 문제점을 가지고 있었다. 그 이유는 시스템 핵심 모듈인 일체형 편광 간섭계에 적용된 무편광 빔스플리터의 유전 코팅에 의한 반사 및 투과경로의 위상지연이 원인이다. 그 결과 편광 간섭계의 각 경로에서 출력되는 빛의 편광상태는 순수한 P파와 S파가 아닌 미소한 복소 파동성분이 생성되어  $\Delta(\lambda)$  측정 정확도가 저하되는 문제가 발생한다. 본 논문은 이러한 광학 소자의 편광 영향성을 극복하고 고정확도 측정 시스템을 위한 최적의 정렬방법을 제안하였고 실험을 통해 제안된 정렬방안 적용 후 QWP측정으로 기존 정렬방법 대비 2배이상의 정확도 개선효과를 검증하였다.

#### 감사의 글

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIP) (2022R111A3071810).

#### 참고문헌

1. R. Attota, T. A. Germer, and R. M. Silver, "Through-focus scanning-optical-microscope imaging method for nanoscale dimensional analysis," *Opt. Lett.* 33(17), 1990–1992 (2008).
2. X. Niu, N. Jakatdar, J. Bao, and C. J. Spanos, "Specular spectroscopic scatterometry," *IEEE Trans. Semicond. Manuf.* 14(2), 97–111 (2001).
3. R.M.A. Azzam and N.M. Bashara, *Ellipsometry, and Polarized Light Amsterdam* (North-Holland, 1987).
4. H. Fujiwara, *Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications* (John Wiley & Sons, 2007).

5. D. Kim, M. Jin, W. Chegal, J. Lee, and R. Magnusson, "Calibration of a snapshot phase-resolved polarization-sensitive spectral reflectometer," *Opt. Lett.* 38(22), 4829–4832 (2013).
6. D. Kim, Y. Seo, Y. Yoon, V. Dembele, J. Yoon, K. Lee, and R. Magnusson, "Robust snapshot interferometric spectropolarimetry," *Opt. Lett.* 41(10), 2318–2321 (2016).
7. A. Nazarov, M. Ney, and I. Abdulhalim, "Parallel spectroscopic ellipsometry for ultra-fast thin film characterization," *Opt. Express* 28(7), 9288–9309 (2020).
8. P. Hlubina, D. Ciprian, and J. Lunacek, "Spectral interferometric technique to measure the ellipsometric phase of a thin-film structure," *Opt. Lett.* 34(17), 2661–2663 (2009).
9. K. Oka and T. Kato, "Spectroscopic polarimetry with channeled spectrum," *Opt. Lett.* 24(21), 1475–1477 (1999).
10. T. Wakayama, Y. Otani, and N. Umeda, "One-shot birefringence dispersion measurement based on channeled spectrum technique," *Opt. Commun.* 281(14), 3668–3672 (2008).
11. D. Kim and V. Dembele, "One-piece polarizing interferometer for ultrafast spectroscopic polarimetry," *Sci. Rep.* 9(1), 5978 (2019).
12. V. Dembele, S. Choi, W. Chegal, I. Choi, M. J. Paul, J. Kim, and D. Kim, "Dynamic spectroscopic ellipsometry based on a one-piece polarizing interferometric scheme," *Opt. Commun.* 454, 124426 (2020).
13. I. Choi, V. Dembele, S. Kehiryzadehkhaghah, G. Hwang, B. Charron, J. F. Masson, and D. Kim, "Robustness enhancement of dynamic spectroscopic ellipsometry by compensating temperature dependency of the monolithic polarizing interferometer," *Appl. Opt.* 61(26), 7653–7661 (2022).
14. M. Gilo, "Design of a nonpolarizing beam splitter inside a glass cube," *Appl. Opt.* 31(25), 5345–5349 (1992).
15. M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, "Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry," *J. Opt. Soc. Am.* 72(1), 156–160 (1982).

---

접수일: 2023년 8월 24일, 심사일: 2023년 9월 6일,  
 게재확정일: 2023년 9월 12일