

간섭기반 스냅샷 분광편광위상측정의 열 안정성 분석

최인호* · 뎀베레바마라* · 제야쿠마르폴마단* · 최석현* · 김준호* · 백병준* · 김대석*[†]

* 전북대학교 기계시스템공학과

Thermal stability analysis of interferometric snapshot spectro-polarimeter

Inho Choi*, Vamara Dembele*, Madhan Jayakumar Paul*, Sukhyun Choi*, Junho Kim*,

Byung-Joon Baek* and Daesuk Kim*[†]

[†]Mechanical system Engineering, Chonbuk national university

ABSTRACT

In typical spectroscopic ellipsometry, the optical and geometrical properties of thin film and nano pattern can be obtained by measuring the polarization state of light reflected/transmitted from the object by rotating a analyzer or a compensator. We proposed a snapshot spectroscopic ellipsometric system based on a modified Michelson interferometer to overcome the time-consuming measurement principle due to rotating part. The proposed system provides spectral ellipsometric parameters (ψ , Δ) in real time by using a single spectral interference signal generated in the interferometric polarization module. However, it has a long-term stability problem resulting in $\Delta(k)$ drift. In this paper, it is experimentally proved that the drift problem is caused by anisotropic refractive index change of the beam intersection layer in beam splitter of interferometer.

Key Words : Spectroscopic ellipsometry, Interferometric polarization modulation, Temperature dependency

1. 서 론

현대 사회에 첨단 과학 기술의 발전은 계속적으로 거듭되고 있다. 첨단 과학 기술을 크게 분류하면 ET(Information technology), BT(Bio technology), NT(Nano technology) 등 다양한 분야가 존재하는데, 이러한 과학 기술들의 발전을 위한 기반으로 컴퓨터 및 전자 산업의 발전이 중요시 여겨지고 있다. 전자 제품 프로세서 성능 향상을 위해 기술의 핵심인 반도체 IC 칩 내부에 연산을 위한 NAND GATE 회로가 다량 집속 되어야 하는데, 이는 초미세회로로써, 현재에는 제작 공정 발달로 인해 선 폭 및 패턴이 수 나노 미터 수준까지 구현 가능해진 상황이다. 제조 공정이 발달됨에 따라 측정 기술에도 관심이 집중되고 있으며, 광학적인 측정 방법은 빠르고 정밀하여 반도체 디스플레이

이 산업의 생산 제조업 현장에서도 중요한 측정기술로써, 다양한 분야에 활용되고 있다 [1-4]. 그러나 제조 공정이 지속적으로 발달됨에 따라 측정에 사용되는 파장보다 선 폭 및 패턴이 소형화됨으로써, 회절 한계라는 광학적 측정방법의 한계성을 갖게 되었고, 이러한 한계를 극복하기 위하여 빛의 민감한 성질인 편광을 이용한 측정 기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 편광 측정 기술은 극도로 민감한 측정 능력을 제공한다 [5]. 이미 수 십년전부터 분광 간섭계, 타원 계측법, 편광 측정법 등 이에 대한 연구가 다양하게 이루어져왔다 [6-10]. 일반적인 타원 계측기 및 편광기는 기계적인 회전부 또는 전기적 변조 모듈 장치를 통해 타원측정 요소인 Ψ , Δ 를 추출하여 수 나노 미터 수준의 박막 두께 및 나노 패턴의 형상을 분석하는 측정장비로써, 산업계와 연구용으로 널리 사용되고 있다. 그러나 이는 높은 정밀도를 제공하는 반면, 구동부로부터 인하여 1회 측정에 수 초가 소요되는 단점을 갖는다 [11]. 모

[†]E-mail: dashi.kim@jbnu.ac.kr

든 산업 라인에서 공정속도는 중요한 인자이며, 최근 본 연구팀에서는 이러한 기존 측정 기술이 갖는 단점, time loss를 감소시키고자 간섭계 기반의 타원계측각(Ψ , Δ)을 획득하는 새로운 방법의 접근을 시도하였다 [12~15]. 제안된 시스템은 간섭 편광 변조 모듈로부터 발생된 간섭신호를 측정 알고리즘을 통해 약 20Hz의 속도로 타원계측각(Ψ , Δ)을 제공한다. 이러한 실시간 분광 스톱스 벡터 측정 능력은 Roll to roll 나노 패터닝 제조과정에서 나노 패터의 폭과 균일성을 실시간 모니터링 할 수 있는 능력을 제공할 뿐만 아니라, 역동적인 실시간 측정 속도 능력을 필요로 하는 다양한 분야에 적용 가능할 것이라 예상된다. 하지만 간섭기반 분광편광타원계측 시스템의 핵심인 간섭 편광 변조 모듈은 공기 유동, 진동, 온도 등 여러 환경적인 요인으로 인해 간섭계 내부의 조건들을 미소하게 변화시키고, 결과적으로 측정요소 $\Delta(k)$ 에 변화를 유발한다. 본 논문에서는 대기중의 온도 변화 및 광원의 열에 의한 광학인자의 물성 변화와 간섭기반 분광편광타원계측 시스템과의 영향성 여부를 실험을 통해 검증하고자 한다.

2. 스냅샷 분광편광측정 시스템의 구성 및 이론

제안된 시스템은 크게 광원부, 평행광 파트, 간섭 편광 변조 모듈, 센싱 모듈, 듀얼 분광기로 구성된다. 시스템을 구성 시, 100W 텅스텐 할로겐 램프인 가시광 영역의 광대역 광원을 사용하였고, 이는 지름 600 μm 의 다중모드 fiber를 통하여 평행광 파트로 입사된다. 평행광 파트에 삽입된 렌즈와 편광자는 선형편광(45°)된 평행광을 얻기 위한 목적으로 구성되었다. 평행광 파트를 통과한 beam은 측정 시편을 투과 또는 반사한 후, 제안된 시스템의 핵심인 간섭 편광 변조 모듈로 입사한다. 간섭 편광 변조 모듈로 입사된 빔은 무편광 빔 스플리터에 의해 두 개의 빔으로 분리되고, 각 경로에 삽입된 두 개의 광학 윈도우 또는 편광자를 통과한 후, 알루미늄 코팅 미러에 의해 빔 스플리터 중앙으로 다시 반사된다. 마이켈슨 간섭계에 기초한 본 시스템은 빔 스플리터에 의해 분리된 빔의 각 경로를 direct path와 Modulation path로 정의한다. 두 개의 광학 윈도우가 삽입된 경로를 direct path라 하고, 이는 간섭신호의 비선형 효과를 보정하기 위한 목적으로 고안되었다. 두 개의 편광자가 삽입된 경로를 Modulation path라 정의하며, Pol_1(45°)는 간섭신호의 명암비를 올리기 위한 목적으로, Pol_2(0° or 90°)는 편광상태를 p- 또는 s- 성분으로 변조할 목적으로 고안되었다. 추가적으로 간섭 편광 변조 모듈의 두 미러간의 거리차(h)를 약 50 μm 로 고정·정렬함으로써 고주파 간섭신호를 획득할 수 있다. 간섭 편광 변

조 모듈에 의해 발생된 간섭광은 센싱 모듈로 이동하게 되며, 센싱 모듈에 삽입된 폴카 닷 빔 스플리터에 의해 두 개의 빔으로 다시 분리된다. 그리고 각 경로에 삽입된 글랜튠스 선형 편광자(0°, 90°)에 의해 P-, S-성분의 빔이 각각 추출되어, 초점거리 50mm의 두 개의 포물선 거울과 다중모드 광학 fiber(지름:1000 μm)를 통해 듀얼 분광기 TM, TE mode로 입사된다. 사용된 분광기의 측정 범위는 515nm-641nm이며, 1,251 픽셀배열의 센서 분광기이다.

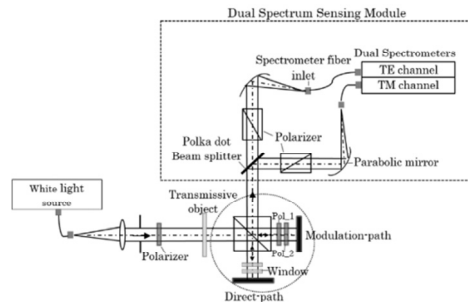


Fig.1. 스냅샷 분광편광타원계측기 개략도

위의 Fig.1은 간섭기반 스냅샷 분광편광타원계측기의 개략도이다 [13]. 간섭기반 스냅샷 분광타원계측 시스템의 측정 알고리즘에 대해 간략히 설명하면, 진폭을 제외한 위상 정보만을 고려할 때, 각 분광기 TM, TE mode로부터 획득된 간섭신호를 푸리에 변환 후, 주파수 도메인에서 DC 성분을 제거하고 공액 복소수인 AC 성분을 따로 필터링하여 역 푸리에 변환 시, 최종적으로 P-파와 S-파에 대한 위상 정보를 획득하는 과정을 지닌다 [16]. 위의 제안된 시스템을 이용하여 Object를 삽입하지 않고 측정했을 시, 광원부로부터 발생된 광파는 삽입된 모든 광학인자를 통과하여 분광기로 입사되고, 분광 센서를 통해 Fig.2와 같은 빛의 가시광 영역의 간섭신호를 얻을 수 있는데, 분광기로부터 획득된 2개의 간섭신호는 각각 P-파(TM:X)와 S-파(TE:Y) 성분의 간섭신호이다.

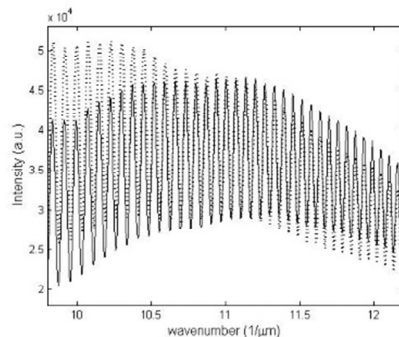


Fig.2. 분광편광타원계측기의 P-, S-파 간섭신호

분광기 TM, TE mode로부터 획득된 가시광 영역의 간섭 신호는 아래의 식(1), (3)과 같이 일반적인 빛의 세기를 구하는 식으로 표현 가능하다.

$$I_{TM}^{no_obj} = \left| E_D^{Xno_obj} \right|^2 + \left| E_M^{Xno_obj} \right|^2 + 2\gamma_{TM} \left| E_D^{Xno_obj} \right| \left| E_M^{Xno_obj} \right| \cos \Phi_{TM}^{no_obj} \quad (1)$$

여기서 TM mode 분광기에서 발생된 위상정보만을 고려하면 아래 식(2)으로 표현할 수 있다.

$$\Phi_{TM}^{no_obj} = 2k(z_D^{no_obj} - z_m^{no_obj}) + (\xi - \xi') + \phi_{TM} \quad (2)$$

$$I_{TE}^{no_obj} = \left| E_D^{Yno_obj} \right|^2 + \left| E_M^{Yno_obj} \right|^2 + 2\gamma_{TE} \left| E_D^{Yno_obj} \right| \left| E_M^{Yno_obj} \right| \cos \Phi_{TE}^{no_obj} \quad (3)$$

TE mode로부터 획득된 간섭신호는 위의 식(3)으로 나타낼 수 있으며, TE mode 분광기에서 발생된 위상정보만을 고려하면 식(4)로 표현 가능하다.

$$\Phi_{TE}^{no_obj} = 2k(z_D^{no_obj} - z_m^{no_obj}) + (\eta - \xi') + \phi_{TE} \quad (4)$$

간섭 편광 변조 모듈에서 빔 스플리터에 의해 분리된 두 빔을 E_D (Direct path), E_M (Modulation path)이라 표현하였다. X, Y는 p-성분(자기파:0°)과 s-성분(전자파:90°)을 의미하고, γ 는 간섭 광의 가시도 함수를 나타내는데, 이는 $\left| E_D^{Xno_obj} \right|^2 + \left| E_M^{Xno_obj} \right|^2$ 을 $2 \left| E_D^{Xno_obj} \right| \left| E_M^{Xno_obj} \right|$ 로 나누어줌으로써, 계산해 낼 수 있다. 위의 식(2), (4)에서 ξ , η 는 광원으로부터 발생된 광파의 위상으로써, X, Y에 해당되는 광파의 초기 위상을 의미하고, ξ' 은 광원 진동에 따른 위상 변화를 의미한다. 마이켈슨 간섭계에서 광경로차는 왕복거리이므로, 경로차에 의한 위상 변화는 $2k(z_D^{no_obj} - z_m^{no_obj})$ 로 2배 증가된다. ϕ_{TM} , ϕ_{TE} 는 간섭 편광 변조 모듈에 의해 발생하는 추가적인 위상정보를 의미하며 TM, TE mode 각 분광기로부터 획득된다. 이는 온도의 함수로써, 본 연구에서 문제를 유발하는 가장 중요한 인자이다. 제안된 시스템을 이용하여 no object 측정 시, 광원부에서 발생된 광파가 삽입된 모든 광학계를 통과하여 각 분광기 TM, TE mode로 입사될 때까지 발생하는 모든 위상 정보를 위의 식 (2), (4)와 같이 표현할 수 있으며, 이는 광원 진동, 광학인자, 간섭계의 광경로차 등 시스템에 의해 발생하는 총 위상 변화량을 의미한다. 제안된 시스템에 측정 시편 object를 삽입하여 측정하게 되면,

object에 의해 변화된 위상 정보를 위의 과정과 동일한 방법으로 추출해 낼 수 있다 [13].

$$I_{TM}^{obj} = \left| E_D^{Xobj} \right|^2 + \left| E_M^{Xobj} \right|^2 + 2\gamma_{TM} \left| E_D^{Xobj} \right| \left| E_M^{Xobj} \right| \cos \Phi_{TM}^{obj} \quad (5)$$

$$\Phi_{TM}^{obj} = k(z_D^{obj} - z_m^{obj}) + (\xi - \xi') + (\delta_{TM} - \delta') + \phi_{TM}' \quad (6)$$

$$I_{TE}^{obj} = \left| E_D^{Yobj} \right|^2 + \left| E_M^{Yobj} \right|^2 + 2\gamma_{TE} \left| E_D^{Yobj} \right| \left| E_M^{Yobj} \right| \cos \Phi_{TE}^{obj} \quad (7)$$

$$\Phi_{TE}^{obj} = k(z_D^{obj} - z_m^{obj}) + (\eta - \xi') + (\delta_{TE} - \delta') + \phi_{TE}' \quad (8)$$

위의 식 (5), (7)은 object 측정 시, 듀얼 분광기 TM, TE mode를 통해 얻은 간섭신호의 세기를 나타내고, 식(6), (8)은 각각의 분광기에서 발생하는 위상 정보를 나타낸다. 식(6)과 (8)에서 $(\delta_{TM} - \delta')$, $(\delta_{TE} - \delta')$ 는 object에 의해 추가적으로 발생된 위상 변화량을 의미한다. object, no object를 측정하면, 측정에 사용된 모든 파장에 대한 p-파와 s-파의 위상차인 $[\Phi_{TM}^{obj}(k) - \Phi_{TE}^{obj}(k)]$, $[\Phi_{TM}^{no_obj}(k) - \Phi_{TE}^{no_obj}(k)]$ 를 계산해 낼 수 있고, 이를 차감함으로써, 식 (9)와 같이 최종적으로 측정 시편에 의해 발생된 $\Delta_{cal}(k)$ 를 획득할 수 있다 [13]. [단, 조건은 $(\phi_{TM}' - \phi_{TE}') = (\phi_{TM} - \phi_{TE})$]

$$\Delta_{cal}(k) = \Delta^{obj}(k) - \Delta^{no_obj}(k) = [\Phi_{TM}^{obj}(k) - \Phi_{TE}^{obj}(k)] - [\Phi_{TM}^{no_obj}(k) - \Phi_{TE}^{no_obj}(k)] = \delta_{TM}(k) - \delta_{TE}(k) \quad (9)$$

간섭기반 스냅샷 분광타원계측기는 시스템 내부로 입사된 광원이 동일한 광학인자와 광축을 지나 측정되므로, no object와 dark noise를 측정하여 이에 대한 위상 정보를 차감함으로써, 광원 및 전기적 노이즈, 광학인자들에 의해 발생된 대부분의 오차들이 소거되고, 측정 시편에 의해 발생된 위상 변화 정보 $\Delta(k)$ 만을 추출해낼 수 있다.

$$\Delta_{r,cal}(k) = \delta_{TM}(k) - \delta_{TE}(k) + [(\phi_{TM}' - \phi_{TM}) - (\phi_{TE}' - \phi_{TE})] \quad (10)$$

하지만 식(9)는 측정 시, 온도가 일정하게 유지되었을 때에 적용되는 이론이다. 실제로 온도가 변화하게 되면 시스템에 삽입된 이방성 소자의 p-파와 s-파의 위상변화가 발생된다. no object와 object를 측정 시, 식(10)에 표현된 바와

같이 온도가 변화됨에 따라 $(\phi_{TM}' - \phi_{TM}) - (\phi_{TE}' - \phi_{TE})$ 은 소거되지 않고 잔류항으로 존재하게 되며, 이는 측정하고자 하는 $\Delta(k)$ 에 drift 현상을 지속적으로 유발한다.

3. 실험결과 및 분석

제안된 간섭기반 분광편광타원계측 시스템의 핵심 설계 인자는 간섭 편광 변조 모듈 장치이다. 위에서 언급했듯이, 간섭계 내부에 삽입된 두 미러간의 거리차(h)를 인가함에 따라 고주파 간섭신호를 발생시키고 위상 알고리즘을 통해 타원계측각 $\Delta(k)$ 를 추출할 수 있다. 여기서 간섭계 내부의 광경로차는 항시 유지되어야 하지만 환경적인 요인으로 인하여 미소한 변화가 발생된다. 실제로 이러한 환경적인 변화 요인으로 인해 측정에 오차가 발생할 뿐만 아니라, 전체 파장에 대한 $\Delta(k)$ 측정치가 drift되는 현상이 관찰된다. 이를 변화시키는 대표적인 요인은 공기 유동, 진동, 온도 등이 있으며, 본 연구에서는 온도에 대한 영향성만을 실험을 통해 측정하고 분석하고자 한다. 아래의 Fig. 3과 같이 본 실험은 다른 환경적인 변화 요인을 최소화하는 방법으로 진행하였다.

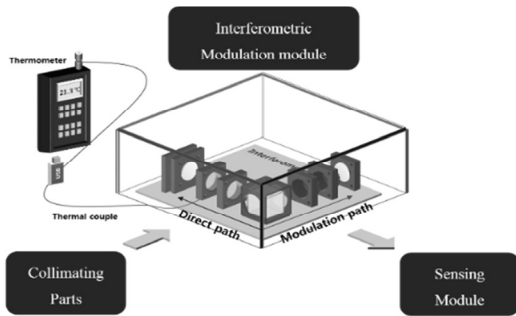


Fig. 3. $\Delta(k)$ 의 온도 영향성 검증 실험의 구성도

우선은 간섭기반 분광편광타원계측 시스템의 진동에 대한 영향성을 감소시키고자 광학 정반 위에 고정하였고, 외부 공기의 유입을 차단시키기 위하여 5mm두께의 불투명 아크릴판을 가공하여 간섭 편광 모듈 장치만을 케이싱하였다. 추가적으로 시간에 따른 온도 정보를 획득하고자 고분해능 온도측정기에 열선을 연결하여 간섭계 내부로 삽입, 시간에 따른 Δ 와 온도변화를 동시에 측정하였다. 사용된 분광기의 측정 조건은 Integration time: 10 ms, Averaging: 10으로 설정하였으며, 측정에 사용된 많은 파장 중 3개의 파장만을 선택하여 측정치의 변화를 확인하였고, Sampling 측정 간격은 30초로, 총 1600개의 Sample, 즉 13시간 30분동안 측정이 이루어졌다.

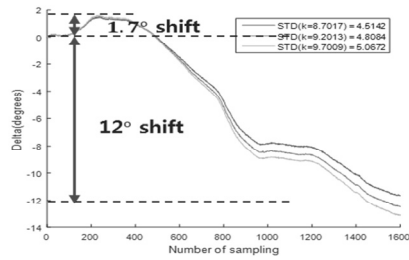


Fig. 4. (a) Δ /시간 변화

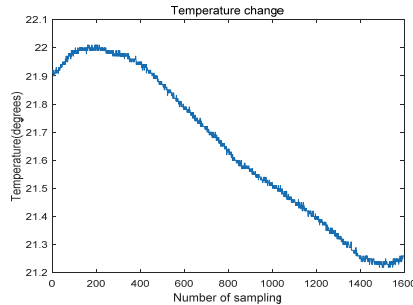


Fig. 4. (b) 온도/시간 변화

Fig 4(a)와 Fig 4(b)는 자연대류가 감소하는 오후 7시 이후부터 13시간 30분동안 계속적으로 측정된 Δ 와 온도 변화 결과이다. 실험결과를 통해 온도와 Δ 의 상관성이 확인되었으며, 온도 변화에 따라 Δ 가 유사한 경향성을 띄며 변화되는 것이 관찰되는데, 이는 계산상으로 온도 0.1° 변화 시, Δ 는 3°의 변화가 있었다.

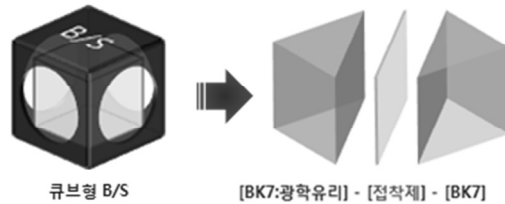


Fig. 5. 큐브형 빔 스플리터의 구성

온도변화는 물질의 고유 열팽창계수에 의해 기구적으로 h에 미소한 위치 변화를 발생시키지만, 핵심인자는 온도변화에 따른 매질안에서의 빛의 굴절률 변화라고 예상된다. 제안된 시스템에 사용되는 빔 스플리터는 큐브형으로써, 두 개의 BK7(광학 유리) 물질 사이에 B/S 코팅 필름이 삽입 되어있다. 위의 Fig5은 큐브형 빔 스플리터의 구성 모습이며, 삽입된 코팅 필름이 온도에 민감하게 반응하여 지속적인 미소 위상 변화를 발생시키는 것으로 판단된다.

4. 결 론

간섭기반 스냅샷 분광편광타원계측 시스템은 기존 선형기술과 다른 접근법을 통해 실시간으로 Stokes vector를 제공할 수 있다. 본 연구에서는 제안된 시스템과 온도와의 영향성 여부를 실험을 통해 검증하였다. 위의 실험을 반복수행한 결과, 시간에 따라 온도와 $\Delta(k)$ 의 변화량이 유사한 경향성을 띄며 변화되는 것을 계속적으로 관측할 수 있었고, 결과적으로 간섭계에 삽입되어 있는 이방성 소자인 코팅 필름이 온도에 민감하게 반응하여 미소 위상변화를 지속적으로 유발시킴을 알 수 있었다.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) Grant funded by the Korean Government (MSIP) (No. 2015R1A5A1037668).

참고문헌

- X. Niu, N. Jakatdar, J. Bao and C. J. Spanos, "Specular Spectroscopic Scatterometry," IEEE Trans. Semi. Manu. 14, 97-111, 2001.
- W. Yang, J. Hu, R. Lowe-Webb, R. Korlahalli, D. Shivaprasad, H. Sasano, W. Liu, and D. S. Mui, "Line-profile and critical dimension measurements using a normal incidence optical metrology system," in Advanced Semiconductor Manufacturing IEEE/SEMI Conference and Workshop (IEEE, 2002), pp. 119-124, 2002.
- Y.-N. Kim, J.-S. Paek, S. Rabello, S. Lee, J. Hu, Z. Liu, Y. Hao, and W. McGahan, "Device based in-chip critical dimension and overlay metrology," Opt. Exp.17(23), 21336-21343, 2009.
- M. Wurm, F. Pilarski and B. Bodermann, "A new flexible scatterometer for critical dimension metrology," Rev. Sci. Instrum. 81(2) 023701. doi: 10.1063/1.3280160, 2010.
- Huard S. Polarization of Light. (Wiley, 1997).
- L. Fymat, "Interferometric Spectropolarimetry: n Alternative Experimental Methods," Appl. Opt. 11, :2255-2264, 1972.
- 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.
- H. Hazebroek and A. Holscher, "Interferometric ellipsometry," J. Phys. Educ. 6, 822-826, 1973.
- L. R. Watkins, "Interferometric ellipsometer," Appl. Opt. 47(16), 2998-3001, 2008.
- K. Oka and T. Kato, "Spectroscopic polarimetry with a channeled spectrum," Opt. Lett. 24, 1475-1477, 1999.
- H. Fujiwara, Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications (John Wiley & Sons, 2007).
- D. Kim, Y. Seo, M. Jin, Y. Yoon, W. Chegal, Y. J. Cho, H. M. Cho, D. G. Abdelsalam, and R. Magnusson, "Stokes vector measurement based on snapshot polarization-sensitive spectral interferometry," Opt. Exp.22(14), 17430-17439, 2014.
- V. Dembele, M. Jin, B-J. Baek and D. Kim, "Dynamic spectro-polarimetric based on a modified Michelson interferometric scheme," Opt. Exp. 24 (13), 14419-14428, 2016.
- D. Kim, Y. Seo, Y. Yoon, V. Dembele, J. Yoon, K. Lee, and R. Magnusson, "Robust snapshot interferometric spectropolarimetry," Opt. Lett. 41, 2318-2321, 2016.
- V. Dembele, M. Jin, I. Choi, W. Chegal, and D. Kim, "Interferometric snapshot spectro-ellipsometry," Opt. Exp. 26(2): 1333-1341, 2018.
- 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, 156 -160, 1982.

접수일: 2018년 9월 3일, 심사일: 2018년 9월 17일,
게재확정일: 2018년 9월 19일