

미소면적 광학이방성 정밀 측정을 위한 수직반사형 타원계의 광소자 편광특성 및 측정정밀도 향상 연구

염경훈¹ · 박상욱² · 서영진² · 이민호² · 김웅기³ · 김상열^{1,2†}

¹아주대학교 분자과학기술학과

☎ 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동

²(주)엘립소테크놀러지

☎ 442-190 경기도 수원시 팔달구 우만동

³한국원자력연구원

☎ 305-353 대전광역시 유성구 대덕대로

(2012년 10월 9일 받음, 2012년 11월 20일 수정본 받음, 2012년 11월 20일 게재 확정)

기존의 반사형 타원계에 광분할기와 프리즘 등의 광학소자를 추가하여 8.0 μm 보다 작은 면적에서 시료의 광학이방성을 측정할 수 있는 수직반사형 타원계를 제작하였다. 수직반사 구조를 구현하기 위해 사용된 광학소자들의 편광작용을 보정하여 광학이방성 측정의 정확도를 향상시켰다. 비편광 광분할기를 사용하고 사분파장 위상지연자를 장착하며 광섬유를 제거하고 파장영역을 최적화하여 광학이방성인자 측정값의 표준편차를 0.00083 으로 줄이고 방위각 변화에 따른 rutile 시료의 광학이방성인자의 변동폭을 0.015 이하로 줄일 수 있었다.

Study on Polarization Characteristics of Optical Device and Improvement of Measurement Precision of Normal Incidence Ellipsometer for Measuring Optical Anisotropy of a Micro Spot

Kyoung Hun Lyum¹, Sang Uk Park², Young Jin Seo², Min Ho Lee², Woong Ki Kim³,
and Sang Youl Kim^{1,2†}

¹Department of Molecular Science and Technology, Ajou University, Suwon 443-749, Korea

²EllipsoTechnology Co. Ltd., Suwon 442-190, Korea

³Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

(Received October 9, 2012; Revised manuscript November 20, 2012; Accepted November 20, 2012)

A normal incidence ellipsometer is fabricated to measure the optical anisotropy of a small spot whose diameter is less than 8.0 μm , by adding a beam splitter and a prism to the conventional rotating analyzer type ellipsometer. The polarizing actions of the added optical components are calibrated to improve the accuracy of the anisotropy measurement. The standard deviation of the optical anisotropy factor decreased to 0.00083, and the variation of the optical anisotropy factor of rutile versus sample azimuth angle variation also decreased to 0.015, after adoption of a non-polarizing beam splitter and a quarter wavelength phase retarder, followed by removal of the optical fiber and a careful choice of measurement wavelength.

Keywords: Ellipsometry, Optical anisotropy, Micro spot, TRISO, OAF

OCIS codes: (240.2130) Ellipsometry and polarimetry; (120.4630) Optical inspection; (160.1190) Anisotropic optical materials; (240.0310) Thin films

†E-mail: sykim@ajou.ac.kr

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

I. TRISO 연료의 구조 및 광학이방성 측정을 통한 안정성평가

원자력 수소 생산시스템은 VHTR(Very high temperature reactor) 시스템, 중간 열교환 시스템, 그리고 수소생산 공정으로 구성되어 있는데 VHTR에서 주 원료로 사용하는 TRISO (Tri structural-isotropic) 연료는 고온에서도 잘 견딜 수 있도록 그림 1에서 보는 바와 같이 약 500 μm 직경의 우라늄 연료핵 (UO₂ kernel) 주변에 완충(buffer)탄소층, 열분해탄소(Pyrocarbon, PyC)층, 탄화규소(SiC)층으로 피복 코팅을 치밀하게 하여 방사능 물질들이 외부로 방출되지 못하도록 한다. 하지만 피복구조가 치밀하지 못하면 방사능이 유출할 수 있으므로 피복구조의 안정성 확보는 대단히 중요하다.^[1] 핵연료 피복구조의 안정성을 측정하기 위해 사용되는 일반적인 비파괴 방식으로 X-선 방사능 방식과 X-선 CT 방식이 있다. X-선 방사능 방식은 X-선 투과를 이용하는 방법으로 피복 코팅층의 두께를 측정할 수 있으나 피복의 경계를 정확하게 측정하기 어렵다. 이를 보완하기 위하여 개발된 X-선 CT 방식은 3차원 구조를 확인할 수 있으며 보다 정확한 경계를 측정할 수 있지만 피복의 치밀함이나 미세 구조결함 여부까지는 측정하지 못하는 한계가 있다^[2].

한편, 등방성 피복층에 결함이 발생하면 그 피복층은 이방성을 나타내는데, 이 구조적 이방성에 동반되는 광학이방성을 측정하여 구조적 결함 여부를 판단할 수 있다^[3]. 시료표면에서의 반사광의 세기를 시료 방위각의 함수로 측정하여 표면 이방성을 정밀하게 측정 분석하는 기법은 RAS(Reflectance Anisotropy Spectroscopy), RDS(Reflectance Difference Spectroscopy) 또는 OCD(Optical Critical Dimension) 등으로 표현되며 Aspnes 등에 의해 입방구조 반도체 결정의 미세 표면 이방성 연구에 적용된 이래 III-V족 화합물 반도체 등의 표면이방성 해석과 관련하여 많은 연구결과들이 발표되었다^[4,9]. 이들 방법에서는 위상변조방식인 PEM(Photoelastic modulator)을 사용하며 이방성측정의 민감도를 최대를 하기 위하여 편광자의 투과축을 시료의 광축과 $\pm 45^\circ$ 의 각도로 유지한다. 한편 미소면적에서의 광학이방성 분포를 측정하기 위해서 2-MGEM(Two-modulator generalized ellipsometer microscope)이 Jellison에 의해 제시되었는데 2-MGEM은 PSG(Polarization

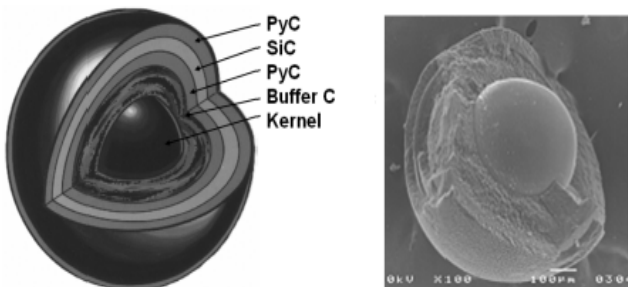


FIG. 1. Schematic(left) and the cross-sectional image(right) of TRISO nuclear fuel.

state generator) 모듈과 PSA(Polarization state analyzer) 모듈이 합쳐진 이원구조로 준 수직입사를 채택하고 현미경에서 적용되는 대물렌즈 및 튜브렌즈 계를 적용하며 CCD를 사용함으로써 5 μm 의 공간분해능을 확보하여 두께가 대략 50 μm 정도인 피복층의 광학이방성 분포를 2차원 영상으로 제시하였다. 그러나 이 장비는 광경로의 간섭효과로 인하여 3-5도 정도의 입사각을 갖고 있으며, 광학소자의 영점설정 등 보정과정과 데이터 처리방법이 상대적으로 복잡하다^[10]. 본 연구에서는 단순한 구조를 가지면서도 미소면적에서 광학이방성을 측정하기 위한 수직반사형 타원계의 구조를 소개한다. 측정하는 광학이방성인자의 정확성과 재현성을 향상시키기 위해 광학소자들의 편광특성을 분석하고 이방성측정에 미치는 영향을 개선하는 방법을 제시하였다. 본 연구에서 제안되는 장치는 PSG 모듈과 PSA 모듈을 분리시킨 단순한 구조로써 완벽한 수직반사를 구현하여 CCD를 사용하지 않고도 8.0 μm 직경내의 미소면적내에서 광학이방성을 정밀하게 측정할 수 있게 한다.

II. 수직반사형 타원계의 구조 및 광학소자들에 의한 편광작용 일차보정

타원계는 시료의 작용으로 인한 빛의 편광상태 변화를 측정하여, 시료의 광특성이나 구조를 분석하는 장비이다. 일반적인 회전검광자형 타원계는 광원에서 입사된 빛이 편광자 모듈을 거쳐 시료에 입사한 뒤 시료로부터 나올 때의 편광상태 변화를 검광자모듈을 거쳐 광검출기에서 감지되는 빛의 세기측정을 통하여 결정하고 분석함으로 시료의 광학물성 및 구조를 분석하는 장치이다^[11]. 본 연구에서는 편광자-시료-검광자로 구성된 기존의 회전검광자형 타원계를 수직반사형으로 구동할 수 있도록 그림 2에서와 같이 대물렌즈 모듈과 튜브렌즈 등 일반 현미경에서 사용되는 기하광학계에 광

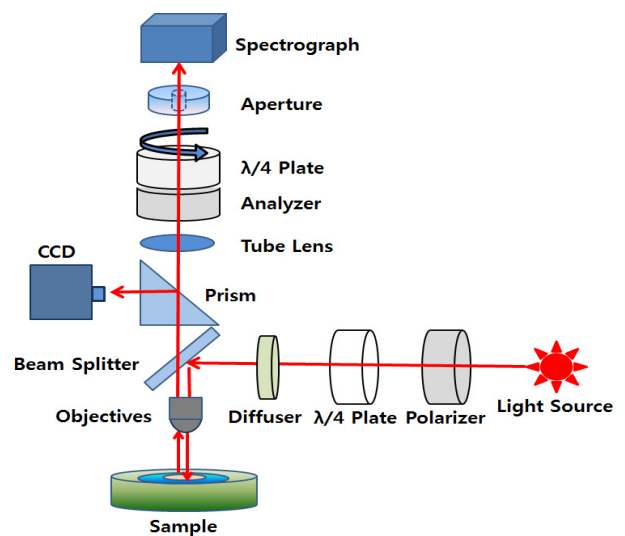


FIG. 2. A schematic figure of the proposed normal incidence ellipsometer.

분할기와 프리즘의 광학소자를 추가한 광학이방성 측정장치를 제시한다. 이 수직반사형 타원계에서는 일반 현미경에서 사용되는 대물렌즈 모듈과 튜브렌즈 등 기하광학계를 그대로 사용하므로 CCD와 같은 2차원 광측정배열을 사용하지 않고도 매우 작은 미소면적에서의 광학이방성을 정밀하게 측정할 수 있으며 CCD와 같은 2차원 광측정소자를 사용하면 공간분해능을 더욱 획기적으로 향상시킬 수 있다. 한편 수직반사형의 타원계에서는 입사광과 반사광의 경로를 시료면에 수직으로 하는 동시에 측정하는 시료면을 영상으로 관찰하기 위하여 CCD 카메라 등을 장착하는데 이를 위하여 광분할기와 프리즘을 사용한다. 이렇게 수직반사형 구조를 구현하기 위해 도입한 프리즘과 광분할기의 편광작용을 정확하게 보정하여야 광학이방성 측정의 정확성을 기할 수 있다.

이방성 시료면에서의 반사율은 입사광의 편광상태에 따라 달라지는데 본 수직반사형 타원계의 회전검광자의 방위각을 변화시키면서 측정된 반사율이 최대일 때 그 값을 R_{max} , 최소일 때 그 값을 R_{min} 라 두면 반사에 따른 편광의 정도 D (Diattenuation)를 다음 식과 같이 정의한다.

$$D = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{max} + R_{min}} \quad (1)$$

본 수직반사형 타원계에서는 광학적 등방성 시료를 사용하더라도 이미 논의한 바와 같이 광분할기와 프리즘 등에 의한 편광작용으로 인하여 측정되는 빛의 세기는 검광자의 각도에 따라 달라진다. 따라서 이방성 시료의 반사율을 구할 때 이들 광학소자에 의한 편광작용을 보정해 주어야 하는데 본 연구에서는 일차적으로 아래 식 (2)에서와 같이 광분할기와 프리즘의 편광작용을 보정하였다.

$$R_{sample}(A) = \frac{I_{sample}(A) - I_{dark}(A)}{I_{ref}(A) - I_{dark}(A)} R_{ref} \quad (2)$$

여기에서 A 는 검광자의 방위각을 나타내며 $R_{sample}(A)$ 는 시료의 반사율, $I_{sample}(A)$ 는 시료에서 반사된 빛의 세기, $I_{ref}(A)$ 는 기준시료에서 반사된 빛의 세기, $I_{dark}(A)$ 는 외란광의 세기, 그리고 R_{ref} 는 기준시료의 반사율을 의미한다. 기준시료로는 광학적 등방성 물질이며 그 광학물성이 잘 알려져 있는 단결정실리콘 웨이퍼를 사용하였다. 식 (2)에서 외란광의 세기인 $I_{dark}(A)$ 는 시료표면 이외의 모든 곳으로부터 오는 빛의 세기를 가리키는데 시료를 올려놓지 않은 상태에서 검광자를 회전시키며 측정한다. $I_{sample}(A)$ 와 $I_{ref}(A)$ 도 각각 시료 또는 기준시료에서 반사한 빛의 세기를 검광자의 각도에 따라 측정한다.

식 (2)에 따라 구해진 이방성 시료의 반사율은 회전검광자 방위각의 조화함수 꼴로 변하는데 그 주기는 180도이다. 따라서 반사율을 식 (3)과 같은 표현에 최적맞춤한 푸리에 계수들을 사용하여 이방성의 정도를 간편하게 정량화할 수 있다.

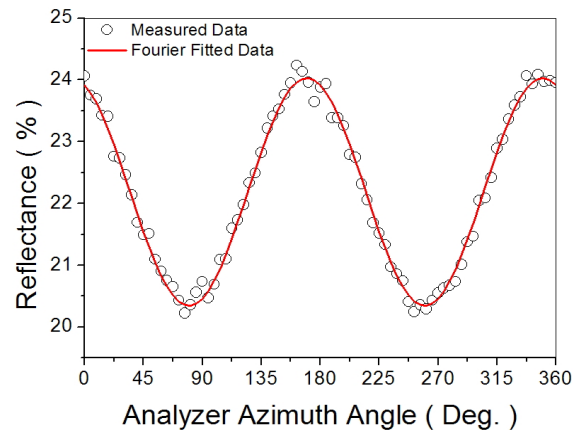


FIG. 3. Measured reflectance(open circle) and the best-fit one(solid line) of an anisotropic sample(rutile) versus sample azimuth angle.

$$R_{sample}(A) = R_0(1 + \alpha \cos 2A + \beta \sin 2A) \quad (3)$$

여기에서 R_0 는 반사율의 평균값이며 α 와 β 는 광학이방성의 정도와 광축의 방향을 내포하고 있는 푸리에 계수들이다. 그림 3은 이방성 시료(rutile)의 반사율과 식 (3)에 따라 최적맞춤한 그래프를 보여준다.

광학이방성의 정도는 광학이방성인자(OAF, Optical Anisotropy Factor)를 사용하여 나타내는데 OAF는 식 (1)에서 정의된 편광의 정도를 사용하여 다음과 같이 정의된다.^[12]

$$OAF = \frac{1+D}{1-D} \quad (4)$$

한편 OAF는 검광자의 각도변화에 따르는 반사율의 변화를 식 (3)에 최적맞춤하여 구한 푸리에계수들을 사용하여 다음과 같이 표현할 수도 있다.

$$OAF = \frac{1 + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{1 - \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \quad (5)$$

III. 광학소자들의 편광작용 분석 및 정밀보정

3.1. 표준시료 및 TRISO 시료의 광학이방성 측정

수직반사형 타원계를 구현하기 위해 사용한 광학소자들인 광분할기와 프리즘 등의 편광작용을 보정한 뒤 이 수직반사형 타원계를 평가하기 위하여 표준시료인 단결정실리콘 웨이퍼를 사용하여 측정된 광학이방성은 다음과 같다. 그림 4는 방위각을 바꾸면서 측정된 표준시료의 반사율을 나타낸 그래프와 이 반사율 측정데이터에 식 (3)을 사용하여 최적맞춤한 그래프이다. 반사율의 평균값은 대략 36.63%이며 최적맞춤과정에서 도출한 푸리에 상수 α 와 β 를 이용하여 계산한 OAF의 평균은 1.0010이며 표준편차는 0.00083으로 이를 식 (1)에서 정의한 편광의 정도 D 로 환산하면 D 의 평균

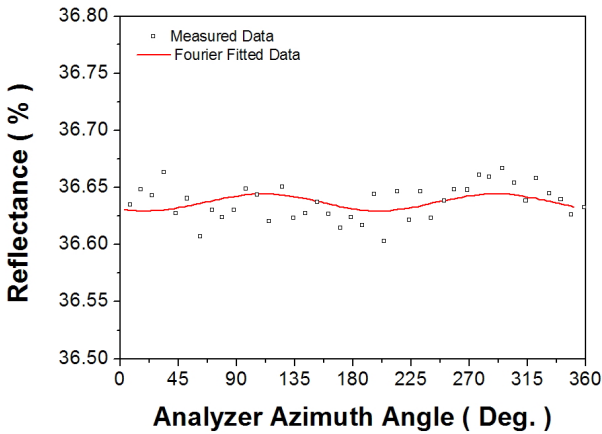


FIG. 4. Measured reflectance (symbol) and the best-fit one (line) of an isotropic sample (crystalline silicon wafer) show almost flat response versus sample azimuth angle.

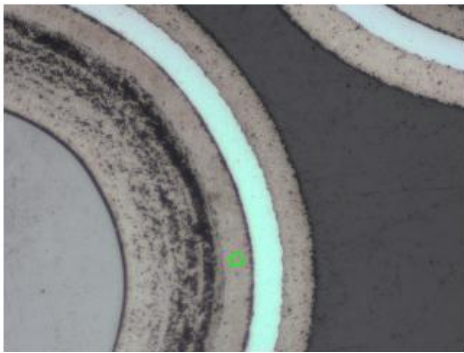


FIG. 5. An image of a cross-sectioned dummy TRISO sample. The small green circle inside an inner PyC indicates the measurement spot.

은 0.0005, 표준편차는 0.00042가 되어 등방성시료의 OAF 측정 정확성 및 측정 재현성이 매우 우수함을 확인할 수 있다. 본 OAF 측정에 사용된 대물렌즈의 배율은 10X, 스펙트로그래프 앞에 위치시킨 개구부의 직경은 400 μm 으로 측정 영역의 직경은 40 μm 이다. 본 장치에서는 10X 대물렌즈 외에도 5X, 50X의 배율을 가지는 대물렌즈를 선택할 수 있으므로 각각 대물렌즈에 따라 80 μm 과 8.0 μm 의 직경을 가지는 미소면적내에서 광학이방성을 측정할 수 있다. 그림 5는 모조(dummy) 연료핵에 완충층, PyC층, SiC층 등의 피복층을 입힌 TRISO 시료의 단면 사진이다. 50X 배율을 가지는 대물렌즈를 사용하여 측정한 내부 PyC층의 광학이방성은 $\text{OAF}=1.0129 \pm 0.002$ 이었다.

3.2. Rutile 시료의 회전에 따르는 광학이방성 변동

TiO₂ 단결정이며 큰 광학이방성을 갖고 있는 rutile 시료의 광학이방성을 측정하였다. 파장이 633 nm일 때 rutile의 정상굴절률과 이상굴절률은 각각 $n_o = 2.585$, $n_e = 2.874$ 이므로 OAF는 1.20 이 되는데 수직반사형 타원계의 광학소자에 의

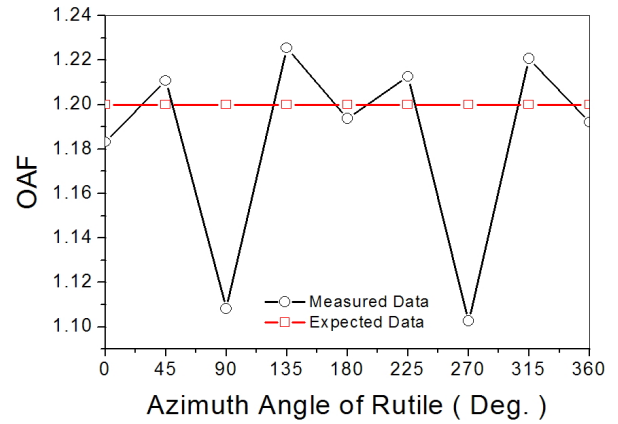


FIG. 6. OAF of rutile shows a considerable variation as its azimuth angle is varied.

한 편광작용이 정확하게 보정되었다면 이방성 시료의 OAF 값은 시료의 위치 즉 시료의 방위각과 무관하게 일정한 값으로 측정되어야 한다. 그러나 이 rutile 시료를 회전시키면서 측정한 OAF는 그림 6과 같은 시료의 방위각 의존성을 보인다. rutile 시료의 OAF 값이 방위각에 따라 달라지는 것은 식 (2)에 따르는 광학소자의 편광작용 보정이 불완전하기 때문이다. 한편 비등방성 시료의 OAF 값이 보이는 방위각 의존성은 수직입사가 아닌 모든 반사형 타원계에서 관찰된다. 수직입사인 경우에도 본 장치에서와 같이 광학소자의 편광의존성이 완전하게 보정되지 않을 경우에 관찰되는 되는데 이방성 시료의 OAF 값이 보이는 이러한 시료 방위각 의존성에 대한 논의는 아직 보고된 바 없다. 본 연구에서도 rutile 시료의 OAF 측정값은 1.20 근방의 값을 가지는데 방위각에 따라 90도 근방에서 1.21에서 1.11 까지 급격히 감소하였다가 바로 1.22로 회복되는 특이한 경향을 보여준다. OAF의 이러한 특이한 경향은 270도 근방에서도 관찰된다. OAF가 보여주는 이러한 특이한 경향은 수직반사형 타원계를 구현하기 위해 사용된 광분할기와 프리즘의 편광작용 보정이 제대로 이루어지지 않았기 때문이라고 판단되어 이들 소자의 투과에 따르는 편광작용과 반사에 따르는 편광작용을 조사하고 이 영향을 최소화하기 위한 연구를 다음과 같이 진행하였다.

3.3. 광분할기와 프리즘의 반사와 투과에 따르는 편광작용들

광분할기와 프리즘을 광학계로부터 떼어낸 후 이 소자들을 투과하는 빛과 반사하는 빛의 편광상태 변화를 각각 측정하였다. 그림 7과 그림 8은 각각 광분할기와 프리즘의 편광작용을 타원상수인 ψ 와 Δ 의 스펙트럼으로 보여주고 있다. 광학소자가 아무런 편광작용을 하지 않을 경우 즉 이상적인 등방성 광학소자일 경우 이 광학소자에 의한 타원상수는 ψ 는 45도, Δ 는 0도 또는 180도가 된다. 광학소자에 의한 편광작용이 있으면 타원상수들은 편광작용의 정도에 따라 이상적인 값으로부터 비례하여 벗어나게 된다. 본 연구에서 일차로

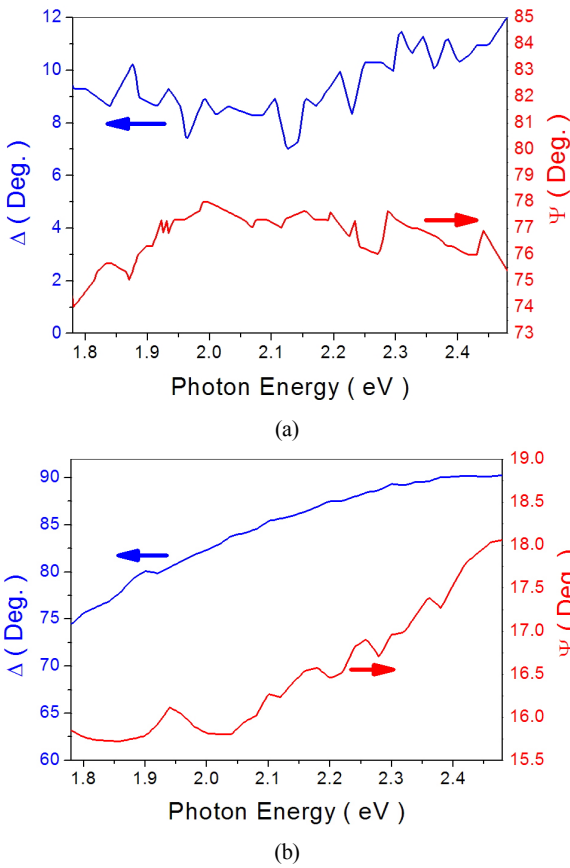


FIG. 7. The spectra of ellipsometric constants of the light passing through the beam splitter (a) and those of the reflected one (b).

사용한 광분할기의 경우 투과광의 경우 Ψ 는 76도, Δ 는 9도 그리고 반사광의 경우 Ψ 는 16도, Δ 는 80도 내외로 측정되어 빛이 광분할기를 투과 혹은 반사할 때 편광작용이 매우 크게 일어남을 알 수 있었다(그림 7). 프리즘에서 반사한 빛은 CCD에서 영상을 관찰하는데 사용되고 투과한 빛만이 광학이방성 측정에 사용되므로 프리즘은 투과한 빛의 편광작용만을 측정하였는데 Ψ 는 45도, Δ 는 7도 내외로 프리즘에 의한 편광작용은 상대적으로 매우 약하였다(그림 8).

광분할기와 프리즘을 포함하여 광학계를 구성하는 소자들의 편광작용을 보정하기 위해 적용한 식 (2)는 빛의 세기 형태로 편광소자에 의한 편광작용을 보정하는 일차근사식이라 할 수 있겠다. 편광소자의 작용을 식 (2)를 사용하여 보정하였을 때는 그림 6에서와 같이 OAF 값이 rutile 시료의 방위각에 따라 달라지는데 이는 식 (2)가 편광소자의 편광작용을 보정하는 데에는 불완전함을 보여주는 것으로 해석된다. 편광소자의 편광작용을 보다 정확하게 보정하여 OAF의 시료 방위각 의존성을 줄이기 위해서는 1) 광학소자들에 의한 편광상태 변화를 Jones 행렬식 등을 사용하여 전기장 표현으로 반영하거나 2) 무시할 수 있을 정도로 편광작용이 작은 광학소자를 사용하여야 하는데 본 연구에서는 후자의 방식을 채택하였다.

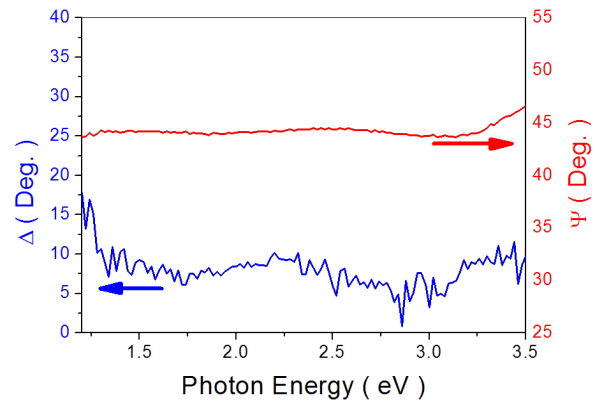


FIG. 8. The spectra of ellipsometric constants of the light passing through the prism.

3.4. 광분할기의 교체, 위상지연자의 추가 및 데이터 안정성 향상을 위한 파장선택

편광작용이 가장 큰 소자는 광분할기이므로 제일 먼저 광분할기에 의한 편광작용을 최소화 하기 위해 비편광 광분할기(nonpolarizing beam splitter)를 (주)한국전광에 주문제작하여 사용하였다. 이 광분할기는 633 nm에서 $R_p=R_s$, $T_p=T_s$ 의 조건을 만족하는 다층박막구조를 가지고 있는데 측정된 타원상수값 들은 그림 9에서와 같이 1.96 eV에서 반사 타원상수가 대략 $\Psi=45$ 도, $\Delta=180$ 도이며 투과 타원상수가 대략 $\Psi=45$ 도, $\Delta=12$ 도 이었다.

그 다음으로는 회전하는 검광자를 통과한 직선편광이 분광기 내부의 회절격자에서 반사될 때 검광자의 방위각에 따라 빛의 세기가 달라지는 검광자 각도의존성을 줄이기 위하여 회전검광자와 분광기 사이에 $\lambda/4$ 위상지연자를 검광자의 투과축과 45도의 각도로 삽입하였다. 이 $\lambda/4$ 위상지연자는 검광자를 통과한 직선편광을 원편광으로 바꾸어 분광기 내부의 회절격자에서 반사될 때 가지는 선편광 방위각의존효과를 크게 감소시켰다.

또한 편광의존성이 최소가 되며 데이터 안정성을 높이기 위해 측정하는 파장대역을 바꾸며 구한 rutile의 OAF 측정결과는 그림 10과 같다. 그림 10은 파장영역별로 시료의 방위각을 바꾸면서 측정한 rutile의 OAF로 그 변화폭은 파장영역을 좁게 가져갈수록 작아지는 경향을 보여주고 있다.

한편 광원으로 사용된 적색 LED는 600-650 nm 대역에 걸쳐 빛을 방출하는데 632 nm를 중심파장으로 하여 파장영역을 좁게 가져갈수록 측정되는 전체 빛의 세기가 약해지며 측정값의 산포도가 커진다. 본 연구에서는 시료 방위각의 변화에 따르는 OAF의 변화폭과 반복측정에 따르는 OAF의 산포도를 고려하여 측정 파장대역을 620-645 nm 으로 결정하였다.

마지막으로 검광자와 분광기를 연결하는 광섬유의 미세한 움직임에 의해서 측정값의 산포도가 불규칙하게 커지는 경향이 관찰되었으므로 광섬유를 제거하고 분광기를 $\lambda/4$ 위상지연자가 부착된 검광자 출구에 바로 부착함으로써 광섬유의 움직임에 의한 데이터 불안정성을 제거하였다.

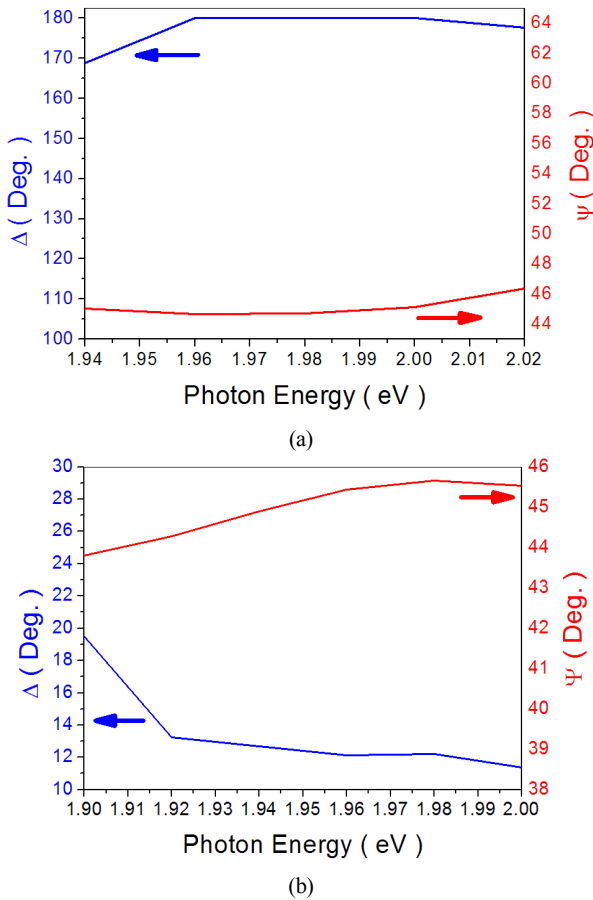


FIG. 9. Ellipsometric constants of the light reflected from the custom-made non-polarizing beam-splitter (a) and those passing through it (b).

이상과 같은 일련의 보정과정을 거친 다음 rutile 시료를 회전시키면서 측정한 OAF 값의 방위각 의존성은 최초 0.12 이었던 변화폭이 0.015 정도로 크게 감소하여 본 수직반사형 타원계의 광학이방성 측정 정확성이 현격히 개선되었음을 확인할 수 있었다. 각 단계별로 편광의존성을 개선시키면서 측정한 일련의 OAF 데이터들을 그림 11에 함께 그려 비교할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 스펙트로그래프 전면에 위치한 개구부의 직경을 400 μm 으로 하고 50X의 배율을 가지는 대물렌즈를 사용하여 8.0 μm의 크기를 가지는 미소면적에서 광학이방성을 측정할 수 있도록 하였는데 개구부와 스펙트로그래프 대신 2차원 측정소자 배열인 CCD를 사용하면 OAF 측정의 산포도는 증가하지만 공간분해능을 크게 향상시킬 수 있다. 예를 들어 화소크기가 6.5 μm인 CCD를 사용한다면 10X의 배율을 가지는 대물렌즈를 사용하더라도 0.65 μm의 공간분해능을 확보할 수 있다. CCD를 사용하여 측정오차와 공간분해능을 최적화시키는 연구는 흥미로운 후속 연구주제가 될 것으로 판단된다.

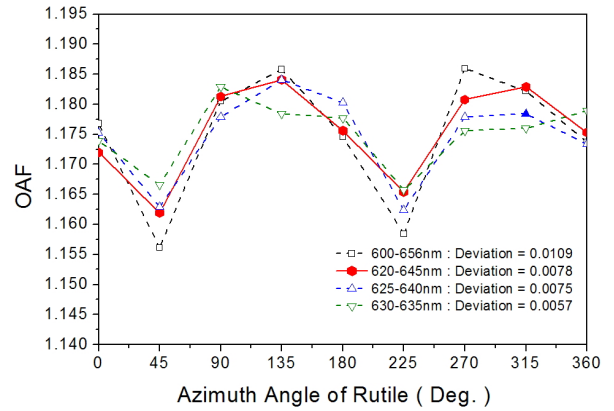


FIG. 10. Variation of the measured OAF of rutile versus its azimuth angle for a few spectral ranges.

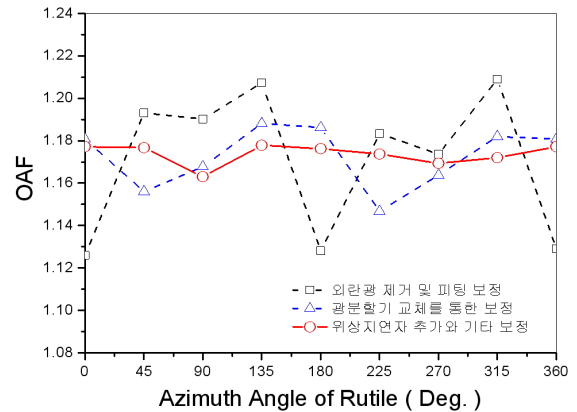


FIG. 11. Reduced azimuth angle dependency of OAF of rutile after a series of calibrations.

IV. 결 론

수직반사형 타원계를 제작하여 8.0 μm 이하의 작은 면적 내에서 시료의 광학이방성을 측정할 수 있게 하였다. 이방성이 큰 시료의 경우 시료의 회전에 따르는 광학이방성인자의 변동폭을 줄이기 위해 비편광 광분할기의 사용, 사분파장 위상지연자의 설치, 광섬유의 제거 및 파장영역 최적화 등 광학소자들의 편광작용을 최소화하고 보정하는 방법들을 도입하여 광학이방성인자 측정값의 정확도와 정밀도를 크게 향상시켰다. 직경이 40 μm인 면적내에서 등방성시료인 단결정 규소의 광학이방성인자 측정값의 표준편차는 0.00083, 방위각 변화에 따른 rutile 시료의 광학이방성인자 측정값의 변동폭은 0.015 이하인 것으로 확인되었다.

References

1. Y. J. Shin and J. H. Chang, "Vision and status of nuclear hydrogen development in Korea," KIC News **10**, (2007).

2. W. K. Kim, Y. W. Lee, and S. W. Ra, "Simulation of the digital image processing algorithm for the coating thickness automatic measurement of the TRISO-coated fuel particle," *International Journal of Information Processing Systems* **1**, 36-40 (2005).
3. K. H. Lyum, S. W. Park, and S. Y. Kim, "Optical anisotropy measurement system with a micro spot using PSA ellipsometry at normal incidence," in *Proc. The Optical Society of Korea Winter Annual Meeting* (Daejeon Convention Center, Daejeon, Korea, 2012), paper TP-II 24.
4. D. E. Aspnes and A. A. Studna, "Anisotropies in the above-band-gap optical spectra of cubic semiconductors," *Phys. Rev. Lett.* **54**, 1956-1959 (1985).
5. O. Archer, S. M. Koch, F. Omnes, M. Defour, M. Rezeghi, and B. Drevillon, "In situ investigation of the low pressure metalorganic chemical vapor deposition of lattice mismatched semiconductors using reflectance anisotropy measurements," *J. Appl. Phys.* **68**, 3564-3577 (1990).
6. D. E. Aspnes, Y. C. Chang, A. A. Studna, L. T. Florez, H. H. Farrell, and J. P. Harbison, "Direct optical measurement of surface dielectric responses: interrupted growth on (001) GaAs," *Phys. Rev. Lett.* **64**, 192-195 (1990).
7. B. Koopmans, B. Richards, P. Santos, K. Eberl, and M. Cardona, "Inplane optical anisotropy of GaAs/AlAs multiple quantum wells probed by microscopic reflectance difference spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.* **69**, 782-784 (1996).
8. C. H. Li, Y. Sun, S. B. Visbeck, D. C. Law, and R. F. Hicks, "Reflectance difference spectroscopy of an ultrathin indium arsenide layer on indium phosphide (001)," *Appl. Phys. Lett.* **81**, 3939-3941 (2002).
9. T. D. Kang, G. S. Lee, and H. Lee, "Reflectance difference spectroscopy of CuPt-type ordered $Ga_{0.5}In_{0.5}P/GaAs$," *J. Korean Phys. Soc.* **47**, S485-S488 (2005).
10. G. E. Jellison Jr. and J. D. Hunn, "Optical anisotropy measurements of TRISO nuclear fuel particle cross-sections: The method," *Journal of Nuclear Materials* **372**, 36-44 (2008).
11. S. Y. Kim, *Ellipsometry* (Ajou University Press, Gyeonggi, Korea, 2000), pp. 115-120.
12. J. D. Hunn, "Comparison of characterization methods for anisotropy and microstructure of TRISO particle layers," I-Neri Technical Progress Report (2007).