《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Vol. 31, No. 6, December 2020, pp. 321-327
DOI: https://doi.org/10.3807/KJOP.2020.31.6.321
ISSN : 1225-6285(Print)
ISSN : 2287-321X(Online)

Investigation of the Light Reflection from Dielectric Thin Films Coated on Substrates

Deok Woo Kim, Jiung Kim, Byoung Joo Kim, and Myoungsik Cha†

Department of Physics, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea

(Received September 25, 2020; Revised October 19, 2020; Accepted October 19, 2020)

We investigated the light reflection from thin films coated on substrates. Using a prism with a high refractive index as the incident medium, the phenomena of the total internal reflection (TIR) of the prism/film/substrate system and the light coupling into the optical waveguide formed by the air/film/substrate system were comprehensively studied and compared. If the refractive index of the thin film is greater than that of the substrate, within the TIR region of the substrate, sharp reflection minima occur at specific angles where the waveguide modes are excited, that can be used to accurately measure the refractive index and thickness of a thin film. On the other hand, if the refractive index of the thin film is smaller than that of the substrate, such waveguide modes do not exist. In this case, although not so distinct as a bulk medium, the TIR effect of the thin film is still observable, accompanied by an interference pattern. In this study we analyzed the overall reflection phenomena occurring from prism/film/substrate structures, to investigate the possibility of measuring the refractive index of a thin film in both cases.

Keywords: Thin film, Total internal reflection, Interference fringe
OCIS codes: (260.6970) Total internal reflection; (310.6860) Thin films, optical properties; (120.2650) Fringe analysis; (120.5700) Reflection

기판 위에 입혀진 유전체 박막의 빛 반사에 관한 연구

김덕우 · 김지웅 · 김병주 · 차명식†

부산대학교 물리학과
㉮ 46241 부산광역시 금정구 부산대학로63번길 2

(2020년 9월 25일 받음, 2020년 10월 19일 수정본 받음, 2020년 10월 19일 게재 확정)

기판 위에 코팅된 박막의 빛 반사 특성에 대해 연구하였다. 입사 매질로 굴절률이 큰 프리즘을 사용하여 박막/기판 계의 내부 전반사 현상과 공기/박막/기판 계가 이루는 도파로로 빛이 결합되어 들어가는 현상을 종합적으로 비교, 연구하였다. 박막의 굴절률이 기판의 굴절률보다 큰 경우에는 빛의 입사각을 증가시켜 나가면 먼저 기판에 의한 전반사가 일어나고, 그 이후 도파로 모드를 맞추는 좁은 각 영역에서 반사율이 떨어지는 현상을 볼 수 있으며, 이것을 이용하여 박막의 굴절률과 두께를 정확히 측정할 수 있다. 반면에 박막의 굴절률이 기판의 굴절률보다 작은 경우에는 도파로 모드가 존재하지 않는다. 이 경우 덩어리 매질에서처럼 뚜렷하지는 않지만 박막에 의한 전반사가 간섭무늬를 동반하여 나타난다. 본 연구에서는 프리즘/박막/기판 구조에서 일어나는 반사 현상을 전반적으로 관측하고 분석하여, 두 경우 모두 박막의 굴절률을 측정할 수 있는 가능성을 조사하였다.

Keywords: 박막, 내부 전반사, 간섭무늬
OCIS codes: (260.6970) Total internal reflection; (310.6860) Thin films, optical properties; (120.2650) Fringe analysis; (120.5700) Reflection

I. 서 론

수 nm~수 μm 정도의 두께를 가지는 다양한 종류의 박막들이 다양한 방법으로 제작되어, 매우 다양한 과학·공학 분야에 응용되고 있다. 특히 광학에서는 반사/투과 필터, 광도파로 등으로의 응용이 활발하다. 따라서 제작된 박막의 물리·화학적 특성은 이러한 응용에 있어서 필수적인 정보이며, 특히 투명한 매질에 대해 굴절률과 두께는 광학 응용에 있어서

†E-mail: mcha@pusan.ac.kr, ORCID: 0000-0002-5997-3881
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

필수적인 정보이며 관련 측정 방법은 꾸준히 연구, 개발되어 오고 있다. 특히 박막의 굴절률을 측정하는 아래와 같은 방법들이 고안되어 널리 사용되고 있다.

1.1. 도파로 모드 맞춤법(waveguide coupling method; WGC법)

박막의 굴절률이 기판의 굴절률보다 큰 경우에는 입사 매질로 굴절률이 큰 프리즘을 사용하면 공기/박막/기판 계가 이루는 도파로로 빛이 결합되어 들어가는 입사각을 측정할 수 있고, 이로부터 박막의 굴절률을 산정해 낼 수 있다[1]. 박막의 두께가 cut-off 값 이상이면 두께에 따라 다수의 모드가 존재하며, 이들은 서로 다른 입사각에서 결합이 일어난다. 이 방법은 2개 이상의 모드가 존재하면 박막의 굴절률뿐만 아니라 두께까지 동시에 결정할 수 있다는 장점이 있다. 굴절률이 큰 프리즘을 이용한 WGC법은 Osterberg와 Smith가 1964년 처음으로 관측하여 보고하였는데, 당시에는 컴퓨터를 이용한 수치적인 계산 및 해석이 쉽지 않아 엄밀한 분석이 이루어지지 않았다[2]. 그 이후 Ulrich와 Torge에 의해 커플링 모드가 3개 이상 생기는 경우에 대해 오차의 최소제곱법을 이용하여 굴절률과 두께를 수치적으로 정확하게 분석하는 방법이 논의되었으며 그 정확도는 10^{-4} 정도를 보증한다[3].

WGC법에서는 프리즘 대신 회절격자를 쓰기도 하는데 Dakss 등에 의해 유리 기판 위에 코팅된 flint 유리 박막에서 실험한 결과가 최초로 보고되었다[4]. 그러나 이 방법은 박막에 격자가 심어져야 하므로 일반적인 박막 시료에 대해 측정법으로 활용하기는 쉽지 않고, 주로 도파로 모드를 여기시켜 빛의 도파로 전파 현상을 연구하는 목적으로 사용된다.

1.2. Kramers-Kronig 변환법

측정된 박막의 흡수 스펙트럼으로부터 박막 물질의 굴절률 분산을 구하는 방법이다. 이것은 유전율(혹은 굴절률) 스펙트럼의 실수부와 허수부 사이에 일반적으로 성립하는 Kramers-Kronig 관계식을 이용한다[5,6]. 이 방법으로는 공명을 포함하는 영역의 굴절률 분산을 구할 수 있지만 박막의 두께와 함께 적어도 한 파장에서 굴절률을 미리 알아야 한다.

1.3. 타원편광 분석법(ellipsometry)

반사광의 편광 타원율을 측정하여 박막의 굴절률과 두께를 분석하는 방법으로 1963년 McCrackin 등이 최초로 제안하고 실험하였다[7]. 이 방법의 장점은 Kramers-Kronig 변환법과 같이 공명 주위로 굴절률 분산을 측정할 수 있고, 매우 얇은 박막에 대해서도 적용가능하다는 것이다. 단점으로는 모델링 방식에 따라 분석 결과에 큰 차이가 날 수 있으며, 결정된 굴절률 값의 불확도가 소수점 10^{-3} 정도이다.

1.4. 박막의 투과율 간섭무늬를 측정하는 방법

박막의 투명 영역에서 spectrophotometer로 박막의 투과율 스펙트럼을 측정하면 박막의 두 경계면(박막/공기, 박막/기판)에서 내부 반사를 겪은 빛과 투과광이 이루는 간섭무늬를 얻을 수 있다[8]. 이 방법은 투명 박막의 굴절률을 쉽게 구할 수 있는 장점이 있지만 분산에 의해 굴절률이 측정 파장 영역에서 변화하므로 정확한 굴절률 측정이 어렵다. 더욱이 이 방법은 간섭무늬가 측정 파장 영역에서 다수 관측될 수 있는 충분한 두께가 필요하므로 얇은 박막은 측정할 수 없다는 것이 큰 단점이다.

1.5. 내부 전반사(total internal reflection; TIR)법

WGC법과 마찬가지로 굴절률이 큰 프리즘을 사용하여 주로 액체의 굴절률 측정에 사용된다. 이는 Abbe 굴절계로 1869년경에 개발되었으며[9] 그 원리는 현재 당도계로 널리 활용되고 있다. 내부 전반사(TIR)법은 고체, 액체상의 다양한 매질의 굴절률 측정에 활용되었으나[10-12] 박막에 응용한 예는 아직 없다. 이 방법을 적용하려면 시료의 표면이 프리즘에 잘 밀착되도록 하기 위해 프리즘의 한 면에 시료를 적시거나(액체) 붙여서(고체), 프리즘/시료의 경계면을 확실히 이루게 하고 여기서 (내부) 전반사가 일어나는 임계각을 측정하여 대상 매질의 굴절률을 결정하였다.

본 연구에서는 시료가 기판 위에 형성된 박막인 경우 프리즘/박막/기판 구조에서 박막의 반사를 입사각에 대해 조사해 보았다. 물론 박막의 굴절률이 기판의 굴절률보다 크면 기존의 WGC법을 적용하여 박막의 굴절률과 두께를 동시에 결정할 수 있지만, 그 반대인 경우에는 이것이 불가능하므로 TIR법을 써서 굴절률과 두께를 동시에 결정할 수 있는 가능성을 연구하였다. 특히 박막의 3차 조화파 발생 실험에서는 기본파와 조화파의 굴절률 정보가 Maker fringe 분석[13] 및 위상정합 혹은 준위상정합 조건을 찾는 데 필수적이다[14]. 3차 조화파 발생에서는 기본파와 조화파의 진동수 차이가 매우 크므로 분산으로 인해 동일 기판 위에 입혀진 박막에서 박막과 기판의 굴절률의 대소 관계가 기본파와 조화파 두 파장에서 역전될 수 있는데, 이 경우 두 파장에서 박막의 굴절률을 정확히 결정하는 데 본 연구 결과가 응용될 수 있다.

II. 이 론

그림 1과 같이 빛이 굴절률이 큰 매질(프리즘)에서 박막으로 입사할 때 입사각을 θ라 하면 굴절각 θ_f는 굴절 법칙 $n_p \sin\theta = n_f \sin\theta_f$에 의해 결정된다. 프리즘의 굴절률이 박막의 굴절률과 기판의 굴절률보다 크다고 전제하면($n_p > n_f, n_s$), 그림에서 묘사한 것처럼 굴절각이 입사각보다 더 커진다. 입사각이 점점 커지면 전반사가 일어나는데, 이것은 아래 두 경우에 따라 서로 다른 거동을 보인다.

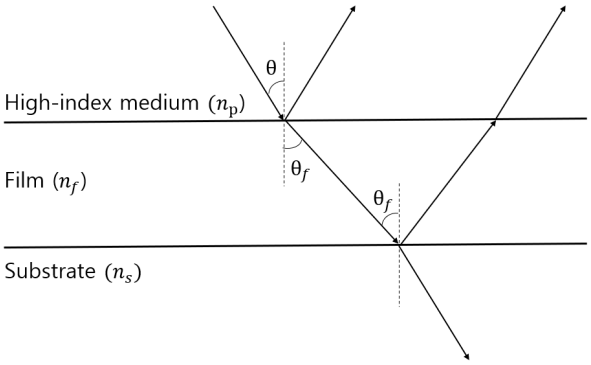

Fig. 1. Schematic diagram describing the reflections and transmissions at the boundaries of high-index-medium/film/substrate system. The arrows indicate the directions of the wave vectors. The boundaries are assumed to be parallel. The refractive index of each medium is written in the parentheses. $n_p > n_f, n_s$.

2.1. 박막의 굴절률이 기판의 굴절률보다 큰 경우($n_f > n_s$)

빛이 프리즘에서 박막으로 입사할 때 전반사가 일어나기 시작하는 임계각 θ_{fc}와 프리즘에서 기판으로 입사할 때의 임계각 θ_{sc}는 굴절 법칙을 통해 다음과 같이 정해진다(물론 빛은 박막에서 기판으로 입사하지만 프리즘에서 입사각을 비교할 때는 프리즘→기판의 임계각을 기준으로 판단하는 것이 편리하다).

$$\theta_{fc} = \sin^{-1}\left(\frac{n_f}{n_p}\right) \tag{1}$$

$$\theta_{sc} = \sin^{-1}\left(\frac{n_s}{n_p}\right) \tag{2}$$

따라서 $n_f > n_s$인 경우에는 $\theta_{fc} > \theta_{sc}$이므로, 박막에 의한 간섭 현상을 무시한다면 수직입사에서부터 입사각을 증가시킬 때 입사각 $\theta = \theta_{sc}$에 도달하는 순간부터 박막/기판 경계면에서 전반사가 먼저 일어나기 시작할 것이다. $\theta > \theta_{fc}$인 입사각 영역에서는 어쨌든 전반사가 일어날 것이므로 입사각이 $\theta_{sc} < \theta < \theta_{fc}$인 영역에서는 어떤 반사가 일어나는지 파동광학적으로 살펴보자.

이 경우에는 박막→기판으로 투과광이 없고 그림 2와 같이 박막 내부에서 다중 반사를 겪은 반사광들이 프리즘 쪽으로 평행하게 투과되어 나오게 된다.

총 반사광의 전기장은 이들 투과광들의 전기장들과 프리즘/박막 경계면에서 바로 반사된 빛의 전기장의 중첩이다. 각 다중반사광들의 박막 내부 전파에 의한 위상차 δ를 고려하면 총 전기장은 프리즘/박막 경계면에서 바로 반사된 빛의 전기장을 제외하고는 초항이 $r_2 t_1 t_1' E_0 e^{i\delta}$, 공비가 $r_2 r_1' e^{i\delta}$인 등비급수이다. 따라서 반사광의 전기장은

$$E_r = r_1 E_0 + \frac{r_2 t_1 t_1' e^{i\delta}}{1 - r_1' r_2 e^{i\delta}} E_0$$

Stokes 관계식[15]

$$r_1^2 = 1 - t_1 t_1' r_1' = -r_1 \tag{3}$$

을 사용하면 반사계수는

$$r = r_1 + \frac{r_2(1 - r_1^2)e^{i\delta}}{1 + r_1 r_2 e^{i\delta}} = \frac{r_1 + r_2 e^{i\delta}}{1 + r_1 r_2 e^{i\delta}}$$

과 같이 계산된다. 따라서 반사율은

$$R = |r|^2 = \frac{|r_1|^2 + |r_2|^2 + 2r_1 r_2 \cos(\delta)}{1 + |r_1 r_2|^2 + 2r_1 r_2 \cos(\delta)} \tag{4}$$

이 되고, 여기서 $|r_2|^2 = 1$이므로(전반사), $R = 1$임을 확인할 수 있다. 즉, $\theta > \theta_{sc}$인 입사각에 대해서는 프리즘/박막/기판 계 전체가 전반사를 한다. 이것은 물론 에너지 보존 측면에서

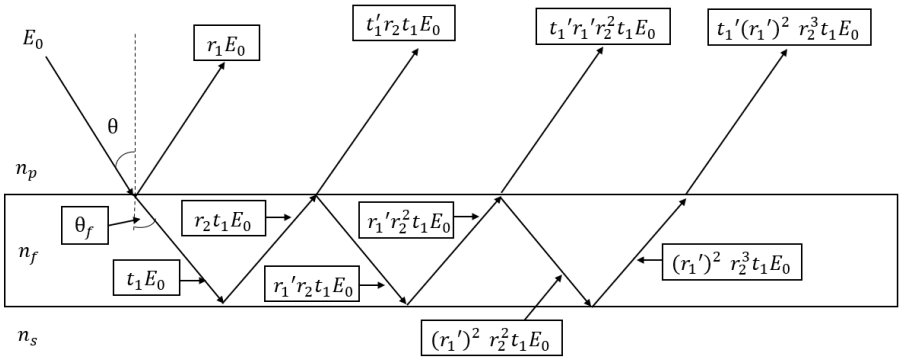

Fig. 2. Multiple reflections in a film while TIR occurs at the film/substrate interface. r and t are the reflection and transmission coefficients, respectively. Subscript 1 represents the prism/film interface, while subscript 2 means the film/substrate interface. Primed coefficients are those for the reciprocally propagating waves at the top interface.

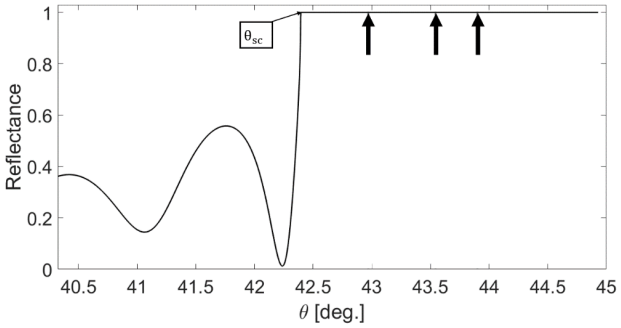

Fig. 3. Calculated reflectance of the prism/film/substrate system for TE-polarization. The critical angle θ_{sc} is marked on the graph, and the vertical arrows indicate the angles at which WG mode coupling occurs (43.901°, 43.544°, and 42.970°). The film thickness is 2.92 μm, $n_p = 2.1621$, $n_f = 1.5025$, and $n_s = 1.4578$.

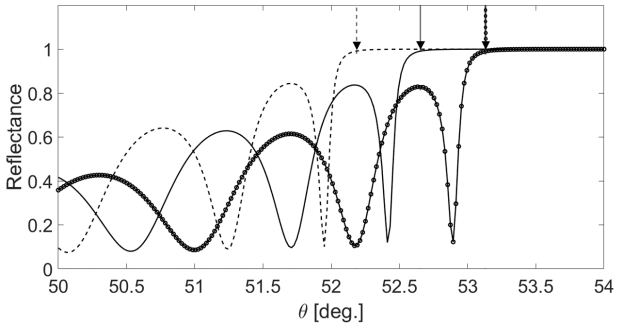

Fig. 4. Reflectance of the prism/film/substrate system for a film thickness of 2.5 μm with three different refractive indices, n_f = 1.58 (dashed line), 1.59 (solid line), and 1.60 (solid line with dots) when $n_p = 2.0$ and $n_s = 1.7$. The critical angles for the film θ_{fc} are marked as arrows.

보면 당연한 결과이지만, 모든 다중 반사광들의 중첩이 파장, 박막의 굴절률, 두께, 입사각, 전반사에 동반되는 위상 변이 등 어떤 것에도 관계없이 프리즘/박막 경계면에서 바로 반사된 빛의 전기장 $r_1 E_0$을 정확히 상쇄한다는 것은 흥미로운 사실이다.

이 경우에는 반사광의 측정으로 박막의 굴절률 정보를 전혀 얻을 수 없지만 기판의 전반사가 일어난 $\theta = \theta_{sc}$ 이후 계속 입사각을 증가시켜 나가면 그림 3에 화살표로 표시한 각에서 WGC에 의한 매우 좁은 폭의 반사율 극소가 예측된다[1]. 여기서는 프리즘/박막/기판 구조에서 빛의 반사를 전달행렬 방법[16]으로 계산하였다. 이 방법은 참고문헌 [17]에 그 응용 예가 잘 설명되어 있다.

이 그림에서 보듯이 입사각이 임계각 θ_{sc}에 접근하면 반사율이 1에 도달하며 θ_{sc} 근처에서는 반사율이 급격히 변하므로 이 결과는 기판의 반사율에 대한 정보를 주로 담고 있다고 볼 수 있다. 그러나 θ_{sc}를 넘어서 기판의 전반사 영역에 들어서면 WGC가 일어나면서 화살표로 표시한 입사각에서 반사율의 손실이 일어난다. 한편, θ_{sc}에 도달하기 이전에 보이는 반사율의 느린 변화(진동)는 박막의 양쪽 경계면에서 반사된 빛의 간섭으로 인한 것으로, 박막의 두께와 굴절률에 의존한다.

2.2. 박막의 굴절률이 기판의 굴절률보다 작은 경우 ($n_f < n_s$)

이 경우에도 프리즘/박막(두께 2.5 μm)/기판 구조에서 전기장의 층간 반사와 투과를 전달행렬 방법[16]으로 수치 계산하여 그림 4에 나타내었다. 그림에 보인 것처럼 입사각을 증가시켜 나갈 때 $\theta_{fc} < \theta_{sc}$이므로 전반사는 박막의 임계각 $\theta = \theta_{fc}$에서 먼저 일어나며, 그 이후에는 반사율이 1이므로 기판의 임계각 θ_{sc}에 대한 정보는 나타나지 않는다. 그러나 이 경우에는 임계각 θ_{fc}에서 반사율의 변화가 이전의 $n_f > n_s$인 경우보다 뚜렷하지 않아 임계각 측정이 어렵다. 임계각 θ_{fc} 주변에서 반사율의 변화가 완만하게 나타나는 현상은 박막의 양쪽 경계면에서 반사된 빛의 간섭에 기인한다. 임계각 이전에 나타나는 반사율의 느린 변화(진동)도 박막에 의한 간섭으로 인한 것으로, 이전의 $n_f > n_s$인 경우와 같이 박막의 두께와 굴절률에 의존한다.

이 경우에는 도파로 모드가 형성되지 않으므로 이전의 $n_f > n_s$인 경우처럼 프리즘을 이용한 WGC 방법을 사용하여 굴절률을 측정할 수 없다. 그러나 그림 4에 볼 수 있듯이 박막의 굴절률에 따라 간섭 무늬가 끝나는 위치, 즉 임계각 θ_{fc}에 가장 가까운 반사율의 극소점이 현격히 달라지므로 반사율 측정으로부터 박막의 굴절률을 산정할 수 있을 것이다. 반면에 박막의 두께는 주로 간섭 무늬의 주기에 영향을 준다(여기에 보이지는 않음). 본 연구에서는 반사광 간섭 무늬를 측정하고 수치 계산 결과와 맞추어 보아 박막의 굴절률과 두께에 대한 정보를 얻을 수 있는 가능성을 연구하고자 한다.

III. 실 험

그림 5는 실험 배치를 묘사하는 개략도이다. 광원으로는 파장 633 nm를 갖는 He-Ne 레이저를 사용하였으며, 레이저로부터 나오는 빔을 빔 직경 1.5 mm로 시준하여 굴절률이 큰 gadolinium gallium garnet (Thorlabs) 프리즘의 한 면을 통해 TE-편광으로 입력하였다. 입사각을 변화시키기 위해 시료를 회전대(rotation stage) 중심에 수직으로 세웠고, 회전대는 stepping motor로 구동하였는데, 0.004°/step으로 시료를 회전시켰다. 시료에서 반사된 빛의 일률(power)은 Si-photodiode로 상대 측정하였다. 프리즘 꼭지각은 44.932도로 측정되었고[18], 프리즘의 굴절률은 프리즘/공기 경계면에서 전반사 임계각을 측정하여 2.1621로 결정되었다. 이때 표준상태에서 공기 굴절률은 1.0003이다[19].

시료는 자외선 경화 수지(UV-curing resin, QiaoQiao DIY)를 투명 기판 위에 spin-coating한 다음 자외선 노광으로 굳혀 약 3 μm 두께의 박막으로 만들었다. WGC 실험을 위해

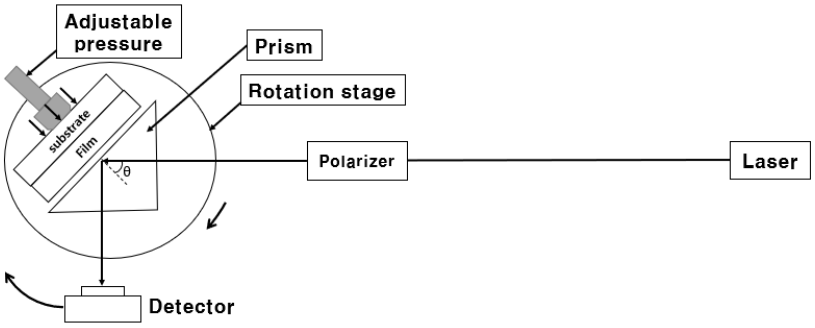

Fig. 5. Experimental setup.

서는 기판의 굴절률이 박막의 굴절률보다 커야 하므로 굴절률이 작은 용융 석영 유리 기판을 사용하였고, TIR 실험을 위해서는 굴절률이 큰 사파이어 기판 위에 박막을 형성하였다. 특히 사파이어 기판은 복굴절을 가지므로 입사각의 변화(회전)에 무관하게 기판이 일정한 굴절률을 갖도록 하기 위해 입사광의 편광을 TE로 선택하여 정상광 굴절률을 사용하였다(편광 방향이 광축에 수직). 두 기판에 대해 그림 5와 같은 실험 배열에서 박막이 없이 기판만 사용하여 전반사 임계각을 측정하였고, 그 결과 두 기판 굴절률은 각각 1.4578과 1.7659이다.

IV. 결과 및 분석

4.1. 박막의 굴절률이 기판의 굴절률보다 큰 경우($n_f > n_s$)

그림 6은 용융 석영 유리 기판 위에 두께 2.9 μm로 입혀진 수지 박막의 프리즘 내부 입사각에 따른 반사율을 보여준다. 이 경우 박막의 굴절률과 두께 분석에는 기판의 임계각인 42.5° 이후에 나타나는 반사율 극소를 보이는 세 개의 각을 사용한다. 이들은 입사각 43.901°, 43.544°, 42.970°에서 각각 3차, 2차, 1차 TE-모드 WGC이 일어남을 보여준다. 이 측정각들을 WGC법으로 분석하여[1] 박막의 굴절률 1.5025, 두께 2.92 μm을 얻었다. 한편 계산으로 구한 반사율(그림 3)에 비해 측정된 반사율은 뚜렷한 임계각 θ_{sc}를 보이지 않는데, 이는 전달행렬 계산에서는 나타나지 않는 WGC 각에서 반사율 극소가 유한한 폭을 가지는 것에 기인하는 것으로 보인다. 즉, WG 모드 수가 커질수록 이 폭이 넓어지며, 그림 6의 데이터에는 명확히 측정되지 않은(임계각 넘어 숨어있는) 4차 WG 모드의 영향이 임계각 부근에 미친 것으로 보인다.

4.2. 박막의 굴절률이 기판의 굴절률보다 작은 경우 ($n_f < n_s$)

그림 7은 사파이어 기판 위에 입혀진 UV 경화 수지 박막의 반사율을 프리즘 내부의 입사각의 함수로 나타낸 것이다. 실선은 프리즘/박막/기판의 3층 구조에 전달행렬법을 적용하여 반사율을 계산한 것이다. 각도에 따라 측정된 반사광의 데이터를 $R_{data}(\theta)$라 하고, 전달행렬법을 이용하여 계산한 반사율을 $R_{theory}(n_f, d_f, \theta)$하면, 변수 n_f, d_f의 조합에 따라 모든 측정 각에 대해 측정된 반사율의 데이터와 계산된 반사율의 편차 제곱을 취한 후, 이들을 합한 양을

$$\sigma(n_f, d_f) = \sum_{\theta} [R_{data}(\theta) - R_{theory}(n_f, d_f, \theta)]^2$$

와 같이 정의한다. (n_f, d_f)의 2차원 망을 형성하고 모든 망 위의 모든 점에 대해 위와 같은 연산을 수행한 다음, σ의 최소값에 해당하는 (n_f, d_f) 조합을 참값으로 택하였다. 그림 7의 데이터에 대해서는 (n_f, d_f) =(1.5053, 3.05 μm)일 때 σ가 최소였다.

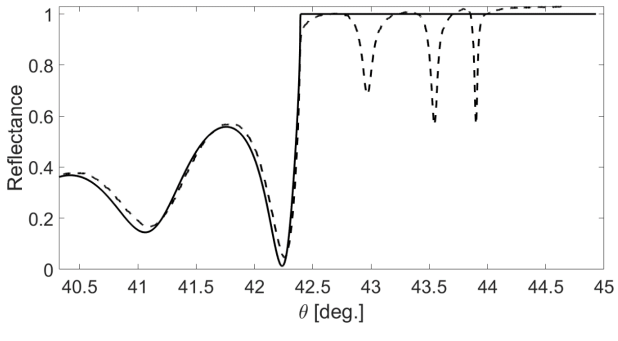

Fig. 6. Reflectance of the UV-curing resin thin film coated on a fused silica substrate (dashed line: data, solid line: reflectance calculated by the transfer matrix method shown in Fig. 3).

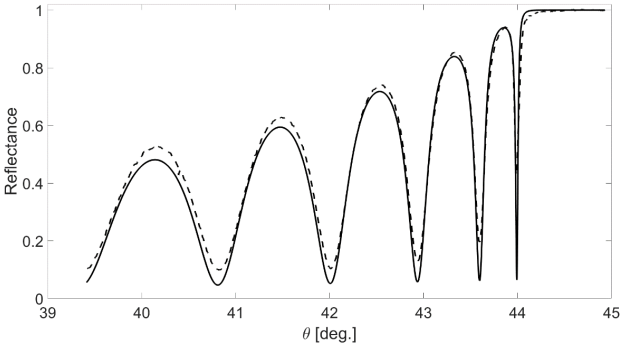

Fig. 7. Reflectance of the UV-curing resin thin film coated on a sapphire substrate (dashed line: data, solid line: calculated by the transfer matrix method).

Table 1. Refractive indices and thicknesses of UV-resin thin films determined by two different methods, waveguide coupling (WGC) and total internal reflection (TIR)

WGC		TIR	
Thickness (μm)	Refractive index	Thickness (μm)	Refractive index
2.92	1.5025	3.05	1.5053

위의 두 경우에 대해 각각 다른 방법으로 측정한 박막의 굴절률과 두께를 표 1에 요약하였다. 두께가 서로 다른 것은 실험에 사용한 기판들이 다르기 때문에 용액을 기판 위에 도포했을 때 표면 장력과 각 박막을 제작할 시점에 스핀코팅기의 실제 회전 속도의 차이로 설명할 수 있다. 그러나 굴절률도 두 실험이 3×10^{-3} 차이를 주는데, 이것은 박막을 굳힐 때 사용한 자외선의 노광량, 온도 등 제작 과정의 미세한 편차와 불안정한 고분자의 특성이 원인이 될 수 있다. 또 다른 원인으로는 프리즘과 박막 사이의 매우 얇은 공기층의 영향을 생각할 수 있다. TIR 데이터 분석에서는 프리즘/박막/기판의 3층 구조를 가정하였지만 실제로는 프리즘을 박막에 완벽히 밀착하기는 불가능하다. 따라서 프리즘/공기층/박막/기판의 4층 구조를 사용하는 것이 좀 더 현실적이며, 공기 두께가 조정 변수로 추가되면 TIR법이 실제 굴절률에 더 근접한 값을 줄 수 있을 것으로 예상된다.

마지막으로 이 방법으로 측정할 수 있는 박막 두께의 범위는 아래와 같이 정해질 수 있다. 박막이 너무 두꺼우면 임계각 이전에 나타나는 간섭무늬의 주기가 너무 조밀해지는데, θ_{fc} 이전에 발생하는 간섭 무늬들의 극대/극소점에 해당하는 각들을 회전대의 분해능으로 정확히 구분할 수 있는 박막의 두께가 TIR 방법을 이용한 박막의 굴절률/두께 측정의 상한선을 설정할 수 있다. 반대로 박막이 너무 얇으면 간섭 무늬의 주기가 매우 커지는데, 극단적으로는 θ_{fc}에 가장 가까운 반사율 극소점이 사라지고, 극대점이 거의 발생하지 않는 경우가 TIR 방법을 이용한 두께 측정의 하한선이 될 것이다.

V. 결 론

고굴절률 기판을 사용한 프리즘/박막/기판의 3층 구조에서 내부 전반사를 이용하여 박막의 두께와 굴절률을 결정하고, 이를 잘 알려진 waveguide coupling (WGC) 방법과 비교, 분석해 보았다. 그 결과 전반사법으로 측정한 굴절률은 WGC 법으로 구한 값과 3×10^{-3} 이내로 일치하였다. 수십~수백 nm 정도의 얇은 공기층을 포함하는 보다 현실적인 모형을 도입한다면 박막의 굴절률을 더 정확하게 결정할 수 있을 것으로 기대한다. 본 연구 결과는 고굴절률 기판에 입혀진 박막의 굴절률을 정확히 측정할 수 있는 방법으로 개발될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2019 학년도 부산대학교 교내학술연구비 지원으로 수행되었다.

References

1. T. Tamir, *Integrated Optics* (Topics in Applied Physics Series Vol. 7), 2nd ed. (Springer, Berlin, Germany, 1979), pp. 83-93.
2. H. Osterberg and L. W. Smith, "Transmission of optical energy along surfaces: Part I, homogeneous Media," J. Opt. Soc. Am. **54**, 1073-1078 (1964).
3. R. Ulrich and R. Torge, "Measurement of thin film parameters with a prism coupler," Appl. Opt. **12**, 2901-2908 (1973).
4. M. L. Dakss, L. Kuhn, P. F. Heidrich, and B. A. Scott, "Grating coupler for efficient excitation of optical guided waves in thin films," Appl. Phys. Lett. **16**, 523-525 (1970).
5. J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd ed. (John Wiley & Sons, 1998), Chapter 7.
6. J. Kim, "Enhanced third harmonic generation in organic multilayers," Ph. D. *Thesis*, Department of Physics, Pusan National University (2019), Chapter 4.
7. F. L. McCrackin, E. Passaglia, R. R. Stromberg, and H. L. Steinberg, "Measurement of the thickness and refractive index of very thin films and the optical properties of surfaces by ellipsometry," J. Res. Natl. Bur. Stand. A. Phys. Chem. **67A**, 363-377 (1963).
8. H. J. Choi, "Measurement of refractive index of wafer-type medium and generation of optical third harmonic," Master *Thesis*, Department of Physics, Pusan National University (2010), Chapter 4.
9. R. A. Paselk, *The Evolution of the Abbe Refractometer* (Humboldt, Published Date: Sep. 1999), https://www2.humboldt.edu/scimus/Essays/EvolAbbeRef/EvolAbbeRef.htm (Accessed Date: 3 Nov. 2020)
10. R. E. Anderson and A. J. Lightman, "Measurements of the refractive-index variations with temperature of a photomonomer," Appl. Opt. **30**, 3792-3793 (1991).
11. Q. W. Song, C.-Y. Ku, C. Zhang, R. B. Gross, R. R. Birge, and R. Michalak, "Modified critical angle method for measuring the refractive index of bio-optical materials and its application to bacteriorhodopsin," J. Opt. Soc. Am. B **12**, 797-803 (1995).
12. H. Li and S. Xie, "Measurement method of the refractive index of biotissue by total internal reflection," Appl. Opt. **35**, 1793-1795 (1996).
13. P. D. Maker, R. W. Terhune, M, Nisenoff, and M. Savage, "Effects of dispersion and focusing on the production of optical harmonics," Phys. Rev. Lett. **8**, 21-22 (1962).
14. J. Kim, C. S. S. P. Kumar, M. Cha, H. Choi, K.-J. Kim, and N. Peyghambarian, "Quasi-phase-matched third harmonic generation in organic multilayers," Sci. Rep. **8**, 16419 (2018).

15. F. L. Pedrotti and L. S. Pedrotti, *Introduction to Optics*, 2nd ed. (Prentice-Hall International, NJ, USA. 1993), pp. 184-188.
16. O. S. Heavens, "Optical properties of thin films," Rep. Prog. Phys. **23**, 1 (1960).
17. B. Son, H. Choi, J. E. Park, and M. Cha, "A study of the phase relations between the reflected and transmitted light waves at a beam splitter and their application to interferometers," Korean J. Opt. Photon. **26**, 103-109 (2015).
18. M. S. Kwon, "Measurement of refractive index of flat optical material by critical angle method," Master *Thesis*, Department of Physics, Pusan National University (2008), Chapter 3.
19. J. A. Stone and J. H. Zimmerman, *Index of Refraction of Air* (Engineering Metrology Toolbox), https://emtoolbox.nist.gov/Wavelength/Edlen.asp (Accessed Date: 3 Nov. 2020)