

# 표면 플라즈몬 공명을 이용한 광학 박막의 광학 상수와 두께 결정

## Determination of Optical Constants and Thickness of Optical Thin Films Using Surface Plasmon Resonance

최 철재, 이 규진, 황보 창권

인하대학교 물리학과

알곤 레이저의 두 파장(488 nm, 514.5 nm)을 사용하여 은 박막과 은 박막 위에 덧증착한 ZnS 박막의 유일한 광학 상수와 두께를 Kretschmann 구조의 표면 플라즈몬 공명을 이용하여 결정하였다.

### 1. 서 론

일반적으로 광학 박막은 빛의 양 혹은 편광을 사용하는 목적에 맞게 조절하기 위해 광학 부품에 진공 증착하여 사용된다. 예를 들면 빛을 적게 반사시키는 카메라의 비반사 코팅 렌즈, 레이저 공진기에 사용되는 고반사 거울, 편광된 빛을 편광에 따라 분리하는 편광 분리기 등에 광학 박막이 이용된다. 진공 증착법으로 제작되는 광학 박막은 제작 조건에 매우 민감하여 설계와 다른 박막이 제작되는 경우가 많은데, 이는 광학 박막 설계시 사용한 박막과 제작된 박막의 광학 상수가 다르기 때문이다. 따라서 정확한 광학 상수는 설계시 알아야 할 매우 중요한 상수이다.

광학 박막의 광학 상수 결정에는 분광 광도계에서 투과율과 반사율을 측정하여 광학 상수를 결정하는 분광 광도계법, 타원계에서 편광 상태의 차이를 이용하는 타원계법 등이 사용되고 있다[1]. 이들은 넓은 파장 영역에서 광학 상수를 얻을 수 있으나, 고가의 장비가 필요하고 여러 물리량들을 측정해야 하며 측정치로부터 광학 상수를 얻을 때 다중 해가 구해지기 때문에 특별한 주의가 필요하다.

### 2. 표면 플라즈몬 공명과 반사율 계산

#### (1) 표면 플라즈몬 공명

표면 플라즈몬은 금속 박막 전자들의 표면을 따른 집단 진동이며, 이와 관련된 표면 플라즈마 파는 금속과 유전 물질의 표면을 따라 짧은 거리를 진행하는 표면 전자기파이다[4,5].

빛으로 표면 플라즈몬을 여기시키기 위해 프리즘의 감쇠 전반사를 이용한 Kretschmann 구조에서는 프리즘 밑면에 얇은 금속 박막을 증착하고, 프리즘 내에 임계각보다 큰 transverse magnetic(TM)파를 입사시킨다. 입사파는 프리즘과 금속 박막의 경계면에서 전반사 되고, 소실(evanescent)파는 경계면에서 금속 박막 속으로 지수 함수로 감소한다. 어느 특정한 입사각과 박막의 두께에서 박막의 경계면과 평행한 방향의 입사파의 파수 벡터 성분과 표면 플라즈몬의 파수 벡터 성분의 크기가 같아지면, 입사파와 표면 플라즈몬이 결합하게 되며, 금속 박막과 공기의 경계면을 따라 표면 플라즈마 파가 진행한다. 이 때 입사파의 에너지는 모두 금속 박막에 흡수되고 반사파는 없게 된다.

(2) 반사를 계산

Fig. 1.의 반사율은 입사 매질은 프리즘, 금속 박막과 유전체 박막으로 구성된 이중 박막, 기판은 공기로 간주하여 계산하였다. Fig. 2.와 같은 균일하고 등방성인 이중 박막은 각각의 특성행렬의 곱으로 나타낼 수 있다[6]. 즉,

$$[M] = \begin{bmatrix} \cos\delta_1 & i \sin\delta_1 / \eta_1 \\ i \eta_1 \sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{bmatrix} \\ \times \begin{bmatrix} \cos\delta_2 & i \sin\delta_2 / \eta_2 \\ i \eta_2 \sin\delta_2 & \cos\delta_2 \end{bmatrix}$$

과 같이 표현되며,

여기서  $\delta = 2\pi N d \cos\theta / \lambda$  : 박막의 광학 위상 두께,

$\lambda$  : 파장,

$d$  : 박막의 물리적 두께,

$\theta$  : 박막에서의 입사각,

$\eta = N / \cos\theta$  : (TM 파의 규격화된 어드미턴스),

$N = n - ik$  : 박막의 복소 굴절률,

$i = \sqrt{-1}$  : 허수

이다.

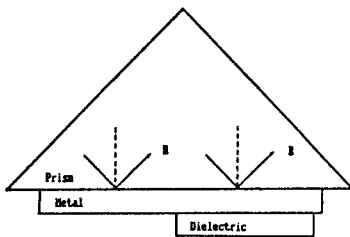


Fig. 1. Kretschmann configuration for surface plasmon resonance.

Incident Medium	$n_0$
Metal	$\eta_1$
Dielectric	$\eta_2$
Substrate	$n_s$

Fig. 2. Two-layer thin films system.

기판과 박막의 경계면으로부터 박막을 통하여 전달된 입사 경계면에서의 규격화된 전기장과 자기장은

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

이 되며,

여기서  $\eta_s$  : 기판의 어드미턴스,

$B$  : 규격화된 전기장,

$C$  : 규격화된 자기장

이다.

입사 경계면(프리즘과 금속 박막)에서의 어드미턴스  $Y$  는 경계면에 평행한 전기장과 자기장의 비이며,

$$Y = \frac{C}{B} \quad (3)$$

가 된다. 따라서 반사율  $R$  은

$$R(d, \theta) = \left[ \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right] \left[ \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right]^* \quad (4)$$

으로 표현되며, 여기서  $\eta_0$ 는 입사 매질의 어드미턴스이다. 입사각을 변화시키며 반사율을 측정할 경우 어느 특정한 입사각에서 입사 매질의 어드미턴스( $\eta_0$ )와 입사 경계면에서의 어드미턴스( $Y$ )가 같아지면, 반사율  $R$  은 식 (4)에서 0 이 되며, 이것을 표면 플라즈몬 공명이라 한다[6.7].

3. 실험 장치 및 박막 제작

표면 플라즈몬 공명을 측정하기 위한 광학 실험장치는 Fig. 3.과 같다. 알콘 레이저(Spectra Physics M-160)의 두 파장(488 nm, 514.5 nm)을 선택하였으며, Glan-Thompson 프리즘을 회전시켜 프리즘의 밑면에 대해 TM 파(p 편광)가 되도록 하였다. 입사각은 분해능이 20 초인 회전대를 사용하여 변화시켰으며, 초퍼(EG&G 125A)로 레이저 광을 단속하였다. 프리즘 밑면의 금속 박막에서 감쇠된 빛의 반사율은 출력계(Spectra Physics No.404), Lock-in 증폭기(EG&G 126), 디지털 전압계로 측정하였다.

은 박막은 실온에서  $1.1 \times 10^{-5}$  torr인 진공 챔버

안의 기관 홀더에 프리즘을 올려놓고, 폴리브덴 보트에 서 손을 녹여 프리즘에 증착하였다. 수정 두께 측정기 (Edwards FTM 5)로 증착률은 0.8 nm/s, 두께는 약 44 nm 이었다. ZnS 박막은 70°C에서  $3.2 \times 10^{-5}$  torr인 진공 챔버의 폴리브덴 보트에서 ZnS를 녹여 증착률 0.2 nm/s, 두께 6.0 nm로 프리즘에 증착된 은 박막 위에 Fig. 1과 같이 계단을 이루도록 증착하였다.

4. 실험 결과 및 논의

은 박막과 ZnS 박막의 표면 플라즈몬 공명을 488 nm 와 514.5 nm 의 두 파장에서 관측하였으며, 각 파장에 대하여 측정된 반사율과 계산한 반사율이 일치하도록 감쇠 최소 자승법에 의한 곡선 맞춤으로 박막의 굴절률, 소멸 계수 및 두께를 결정하였다. 각 파장에 대하여 두 세트의 해가 존재하므로, 이 중 같은 두께를 갖는 해를 선택하여 박막의 유일한 광학 상수를 결정하였다.

(1) 은 박막의 광학 상수

488 nm에서 관측한 표면 플라즈몬 공명의 반사율은 Fig. 4에 점(x)으로 표시하였으며, 실선은 계산된 반사율이다. 488 nm에서 표면 플라즈몬 공명이 일어난 각 ( $\theta_{res}$ )은 44.41° 이고, 은 박막의 광학 상수는 굴절률 0.096, 소멸 계수 2.97, 두께 44.3 nm이다. 514.5 nm에서 측정된 반사율은 Fig. 5에 점(x)으로 표시하였으며, 실선은 계산된 반사율이다.  $\theta_{res}$  는 44.05° 이고, 해 (굴절률, 소멸 계수, 두께)는 각각 0.090, 3.16, 44.0 nm이다.

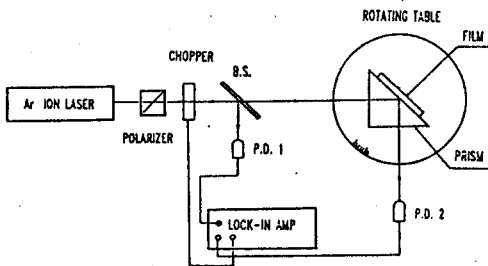


Fig. 3. Schematic diagram of surface plasmon resonance experiment.

(2) ZnS 박막의 광학 상수

ZnS 박막도 488 nm 와 514.5 nm 의 두 파장에 대하여 은 박막과 ZnS 박막으로 구성된 이중 박막으로부터의 반사율을 측정하여 광학 상수를 결정하였다. 관측한 표면 플라즈몬 공명은 Fig. 4.와 Fig. 5.의 점 (+)과 같으며, 점선은 계산된 반사율이다. 공명각은 은 박막보다 증가하고 공명폭은 넓어졌다.

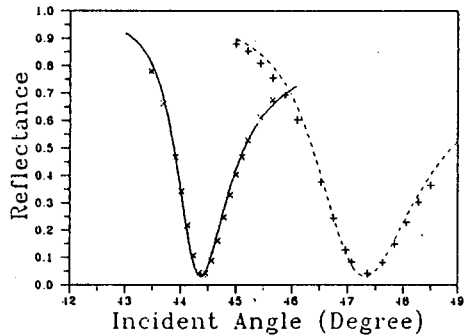


Fig. 4. Reflectance of Ag film and Ag + ZnS film vs incident angle at 488 nm. x ; measured reflectance of Ag film, + ; measured reflectance of Ag + ZnS film, — reflectance of Ag film calculated by the unique solution, ---- reflectance of Ag + ZnS film calculated by the unique solution.

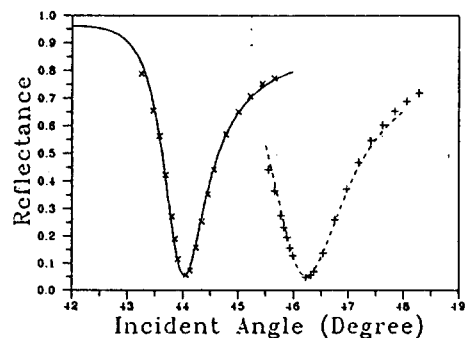


Fig. 5. Reflectance of Ag film and Ag + ZnS film vs incident angle at 514.5 nm. x ; measured reflectance of Ag film, + ; measured reflectance of Ag + ZnS film, — reflectance of Ag film calculated by the unique solution, ---- reflectance of Ag + ZnS film calculated by the unique solution.

488 nm 파장에서 표면 플라즈몬 공명이 일어난 각은  $47.35^\circ$  이고, 굴절률은 2.32, 소멸계수 0.0001, 두께 6.0 nm 이고, 514.5 nm 파장에 대하여 공명각은  $46.22^\circ$ , 굴절률 2.21, 소멸계수 0.001, 두께 6.0 nm 이다. 소멸 계수의 값이 두 파장에 대해 10 배의 차이가 나는 것은 최소 자승법으로 곡선 맞춤할 때 생긴 인위적인 오차이며, ZnS 박막의 소멸 계수는 무시할 수 있을 정도로 작다고 판단된다.

### 5. 결 론

Kretschmann 구조를 이용하여 은 박막과 은 박막 위에 덧증착된 ZnS 박막에서 표면 플라즈몬 공명을 관측하였으며, 알곤 레이저의 두 파장(488 nm와 514.5 nm)을 이용하고 측정된 반사율과 계산한 반사율을 곡선 맞춤하여 은 박막과 ZnS 박막의 유일한 평화 상수와 두께를 결정하였다. 두 파장에서 같은 두께를 갖는 유일해를 선택하였으며 은 박막의 굴절률, 소멸 계수, 두께는 488 nm 에서 각각 0.096, 2.97, 44.3 nm 이며, 514.5 nm 에서 0.090, 3.16, 44.0 nm 이다. ZnS 박막의 굴절률, 소멸 계수, 두께는 488 nm 에서 각각 2.32, 0.0001, 6.0 nm 이며, 514.5 nm 에서는 2.21, 0.001, 6.0 nm 이다.

### 6. 참고 문헌

1. F. Abelès, "Physics of Thin Films," Vol. 6, (Academic Press, New York, 1971), pp 151-204.
2. H.E. de Bruin, R.P.H. Kooyman, and J. Greve, "Determination of Dielectric Permittivity and Thickness of a Metal Layer from a Surface Plasmon Resonance Experiment" Appl. Opt. 29, 1974 (1990).
3. W.P. Chen and J.M. Chen, "Use of Surface Plasma Waves for Determination of the Thickness and Optical Constants of Thin Metallic Films" J. Opt. Soc. Am. 71, 189 (1981).
4. H. Rather, "Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings," (Springer-Verlag, New York, 1988).

5. H. Rather, "Physics of Thin Films," Vol. 9, (Academic Press, New York, 1977), pp 145-255.
6. H.A. Macleod, "Thin Film Optical Filters," (Adam Hilger Ltd, Bristol, 1986).
7. D.Y. Song, F.S. Zhang, H.A. Macleod, and M.R. Jacobson, "Study of Surface Contamination by Surface Plasmons" Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 678, 211 (1986).