

표면 플라즈몬 공명 측정에 의한 금속 박막의 광학 상수와 두께 결정*

황보 창권 · 최철재 · 최동철

인하대학교 이과대학 물리학과

(1991년 2월 22일 받음)

표면 플라즈몬 공명이 일어나는 공명각과 최적 두께를 여러 금속 박막에 대해 어드미턴스 다이어그램을 이용하여 계산하였으며, 표면 플라즈몬 공명에서 측정된 반사율과 이론치를 곡선 맞춤하여 은박막과 알루미늄 박막의 광학 상수와 두께를 결정하였다. 한 파장에 대해 두개의 해가 존재하므로 알곤 레이저의 두 파장에서 같은 두께를 갖는 해를 광학 상수의 유일 해로 선택하였으며, 금속 박막을 공기 중에 노출시킬 경우, 박막의 표면 변화에 의해 이동된 표면 플라즈몬 공명으로부터 변화된 금속 박막의 광학 상수를 결정하였다.

I. 서 론

빛의 간섭 현상을 이용하는 광학 박막은 빛의 양 혹은 편광을 사용하는 목적에 맞게 조절하기 위해 광학 부품에 유전체 혹은 금속 물질을 진공 증착하여 사용된다. 예를 들면 빛을 적게 반사시키는 카메라의 비반사 코팅 렌즈, 레이저 공진기에 사용되는 고반사 거울, 편광된 빛을 따라 분리하는 편광 분리기 간섭형 대역 통과 필터, 장(단)파장 통과 필터 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.^[1] 본 논문에서 광학 상수는 복소 굴절률로 $n-ik$ 의 형태로 나타내며, n 은 굴절률이고 k 는 소멸 계수이다. 일반적으로 가시 광선 영역에서 유전체 박막은 굴절률이 소멸 계수보다 매우 크며, 금속 박막은 굴절률이 소멸 계수보다 매우 작다.

금속 박막의 광학 상수 결정에는 분광 광도계에서 입사각에 따라 반사율과 투과율을 측정하여 광학 상수를 결정하는 분광 광도계법, 타원계에서 편광 상태의 차이를 이용하는 타원계법 및 여러 파장을 이용한 타원계인 분광 타원계법 등이 널리 사용되고 있다.^[2,4] 이들은 넓은 파장

영역에서 광학 상수 혹은 박막의 길이 변화 등을 얻을 수 있으며 측정치로부터 광학 상수를 얻을 때 다중 해가 구해지기 때문에 특별한 주의가 필요하다.

한편, 얇은 두께의 금속에 여기되는 표면 플라즈몬 공명^[5,6]을 이용한 금속 박막의 광학 상수 결정은 Kretschmann 이후 꾸준히 연구되고 있으며, 최근에는 금속 박막위에 덧증착한 박막의 광학 상수 결정에도 사용되고 있다.^[7-9] 입사각을 변화시키는 이 방법에서는 사용하는 레이저 파장에 대해 정확한 광학 상수를 얻을 수 있으며, 특히 표면 플라즈몬 공명이 표면의 변화에 매우 민감하기 때문에 박막 제작 조건의 변화 혹은 박막의 습기 흡착에 의한 광학 상수의 변화를 측정할 수 있다.^[10-12] 또한 표면 플라즈몬이 여기되는 표면의 전기장이 매우 크므로 비선형 광학과 광전 변조기 등에 이용되고 있으며,^[13,14] 화학비료, 생물 시료 및 기체를 측정하는 센서 등으로 응용되고 있다.^[15-17]

본 연구에서는 표면 플라즈몬 공명을 얻기 위한 금속 박막의 최적 두께와 공명각의 계산, 금속 박막의 증착 조건, 표면 플라즈몬 공명 관측 실험 장치를 소개하고, 곡선 맞춤 시 구해지는 두 개의 광학 상수 중 유일해를 알곤 레이저의 두 파장을 이용하여 구한 실험 결과에 관하여 논의하겠다.

*본 연구는 1990년도 교육부 기초과학 육성연구와 과학재단 신진연구의 지원으로 수행된 과제임.

II. 표면 플라즈몬 공명의 반사율, 공명각 및 최적 두께 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 전자 기파이다.^[5,6] 본 연구에서는 빛으로 표면 플라즈몬을 여기시키기 위해 Fig. 1과 같이 프리즘의 감쇠 전반사를 이용한 Kretschmann 구조를 사용하였다. Kretschmann 구조에서는 프리즘 밑면에 얇은 금속 박막을 증착하고, 프리즘 내에 임계각보다 큰 p-편광파(TM 파)를 입사시킨다. 입사파는 프리즘과 금속 박막의 경계면에서 전 반사되고 소실(evanescent)파는 경계면에서 금속 박막 속으로 지수 함수로 감소하나, 어느 특정한 입사각과 박막의 두께에서 박막의 경계면과 평행한 방향의 입사 파의 파수 벡터 성분과 표면 플라즈몬의 파수 벡터 성분의 크기가 같아지면 입사파와 표면 플라즈몬이 결합하여 금속 박막과 공기의 경계면을 따라 표면 플라즈마 파가 진행한다. 이 때 입사파의 에너지는 모두 금속 박막에 흡수되어 반사파는 없으며, 경계면에 수직인 방향의 전기장의 분포는 지수함수로 경계면에서 가장 크고 금속 박막 속으로는 급격히 감소하나 공기 쪽으로는 긴 꼬리를 가지고 서서히 감소한다.

2. 반사율 계산

Fig. 1에서 입사각의 변화에 의한 반사율은 프리즘 (굴절률 n_0)은 입사매질(0), 얇은 두께의 금속(복소 굴절률 $n - ik$)은 광학 박막(1), 공기(굴절률 n_2)가 기판(2)인 Fig. 2와 같은 단층 박막으로 간주하여 계산하였다. 프리즘에서 입사하는 p-편광파의 입사각은 임계각보다 큰 θ_0 이고, 금속 박막에서는 θ 이며, 공기에서는 θ_2 이다.

Fig. 2에서 균일하고 등방성인 단층 박막은 2×2 특성 행렬 $[M]$ 으로 나타낼 수 있다.^[18] 즉,

$$[M] = \begin{bmatrix} \cos \delta & i \sin \delta / \eta \\ i \eta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

과 같이 표현되며, 여기서 δ 는 박막의 광학 위상 두께로

$$\delta = 2\pi(n - ik)(d/\lambda) \cos \theta \quad (2)$$

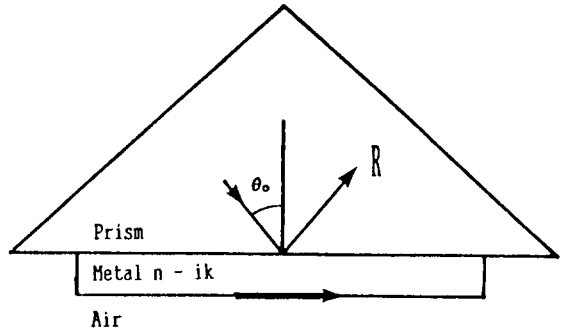


Fig. 1. Kretschmann configuration for surface plasmon resonance.

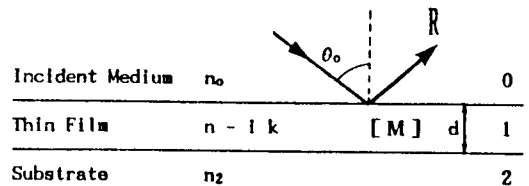


Fig. 2. Single-layer thin film representation of Kretschmann configuration.

이고, λ 는 파장, d 는 박막의 두께이다. 규격화된 어드미턴스 η 는 s-편광파와 p-편광파에 대해 각각

$$\eta_s = \frac{(n - ik) \cos \theta}{\cos \theta_0} \quad (3)$$

$$\eta_p = \frac{(n - ik) \cos \theta}{\cos \theta} \quad (4)$$

이다.

각 경계면에서는 Snell의 법칙인

$$n_0 \sin \theta_0 = (n - ik) \sin \theta = n_2 \sin \theta_2 \quad (5)$$

을 만족하며, 기판과 박막의 경계면(1/2)으로부터 박막을 통하여 전달된 입사 경계면(0/1)에서의 규격화된 전기장 B와 자기장 C는

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

으로 주어지며, 여기서 η_2 는 기판의 규격화된 어드미턴스이다.

입사 경계면(프리즘과 금속 박막)에서의 어드미턴스 Y 는 경계면에 평행한 전기장 B 와 자기장 C 의 비이며, 식(1)과 (6)으로부터

$$Y = \frac{C}{B} = \frac{\eta_2 \cos\delta + i\eta \sin\delta}{\cos\delta + i(\eta_2/\eta) \sin\delta} \quad (7)$$

가 된다. 복소 진폭 계수 ρ 는

$$\rho = \frac{n_o - Y}{n_o + Y} \quad (8)$$

으로 표현되며, 반사율 R 은

$$R(\theta_o, d) = \rho\rho^* = \left| \frac{n_o - Y}{n_o + Y} \right|^2 \quad (9)$$

으로 입사각(θ_o)과 두께(d)의 함수이다.

3. 공명각과 박막의 최적 두께 계산

입사각이 임계각보다 큰 경우 주어진 금속 박막으로부터 표면 플라즈몬 공명을 얻기 위한 박막의 최적 두께와 공명각은 아래와 같은 방법으로 계산하였다. 먼저 어드미턴스 Y (식(7))를 기판부터 박막이 자라는 두께에 따라 계산하였다.¹⁹⁾ Y 를 복소 평면에 Fig. 3과 같은 어드미턴스 다이어그램으로 나타내기 위해, Y 의 계산에 필요한 δ 와 η 를 θ_o 와 d 로 나타내면, 식(2)와 (5)로부터 δ 는

$$\delta = \frac{2\pi d}{\lambda} (n^2 - k^2 - n_o^2 \sin^2 \theta_o^2 - i 2nk)^{1/2} \quad (10)$$

가 되며, 제곱근 계산에서 실수부는 양수이고 허수부는 음수인 해를 취한다. 같은 방법으로 s-편광파의 어드미턴드의 식(3)과 (5)로부터 δ 는

$$\eta_s = \frac{(n^2 - k^2 - n_o^2 \sin^2 \theta_o^2 - i 2nk)^{1/2}}{\cos \theta_o} \quad (11)$$

가 되며, 역시 실수부는 양수이고 허수부는 음수인 해를 취한다. 이 때 p-편광파의 어드미턴스는

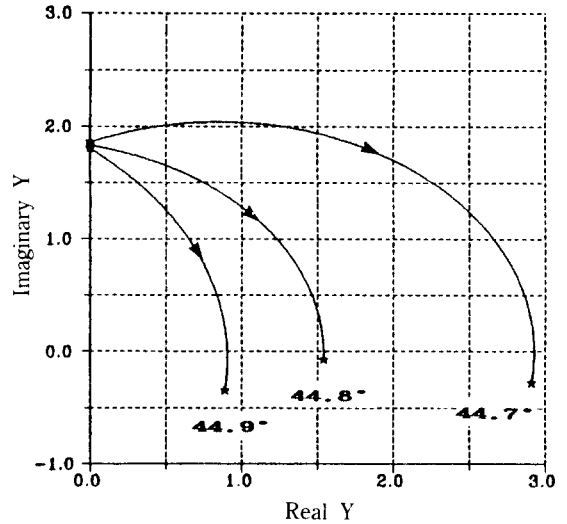


Fig. 3. Admittance loci of Ag thin film is represented in the complex plane at different incident angles as the film thickness increases from the substrate ($d=60$ nm; $n=0.051$, $k=2.78$; $\lambda=488$ nm; $n_o=1.522$; $n_2=1.0$).

$$\eta_p = \frac{(n - ik)^2}{\eta_s} \quad (12)$$

가 된다. 기판의 규격화된 어드미턴스 η_2 도 위와 같은 방법으로 계산하면 p-편광파의 경우 양의 허수인

$$\eta_2 = \frac{n_2 \cos \theta_o}{\cos \theta_2} = i \frac{n_2^2 \cos \theta_o}{(n_o^2 \sin^2 \theta_o - n_2^2)^{1/2}} \quad (13)$$

이 된다. 식(7)과 (10)-(13)을 이용하여 Y 를 계산하면, Fig. 3에서와 같이 Y 는 허수인 η_2 를 출발하여 금속 박막 두께가 증가하는 동안 복소 평면에 원을 그리며, 도착 점은 프리즘과 박막의 경계면에서의 어드미턴스가 된다. 입사 경계면에서의 어드미턴스 Y 가 어느 특정한 입사각 ($\theta_o = \theta_{res}$; 공명각)과 최적 두께(d_{opt})에서 입사 매질의 굴절률(n_o)과 같아지면, 복소 진폭 계수 ρ 와 반사율 R 은 각각 식(8)과 (9)에서 0이 된다. 투과율도 0이므로 입사파는 모두 금속 박막에 흡수되어 표면 플라즈마 파가 생성된다. Fig. 3에서 입사각이 θ_{res} 로부터 0.1° 만 차이가

나도 Y는 입사 매질의 굴절률로부터 많이 벗어나 반사율이 급격히 증가하여 입사각에 대한 반사율의 반치폭이 매우 작으므로 이러한 현상을 표면 플라즈몬 공명이라 한다.

식 (7)에서 어드미턴스 Y를 실수와 허수 부분으로 나누어

$$Y = Re(Y) + i Im(Y) \tag{14}$$

으로 정의할 경우,

$$Re(Y) = n_0 \tag{15}$$

$$Im(Y) = 0 \tag{16}$$

이면, 식(8)의 복소 진폭 계수와 식(9)의 반사율은 0이 되며, 이 때의 θ_{res} 와 d_{opt} 의 근사치를 어드미턴스 다이어그램으로부터 구할 수 있다. 식(15)와 (16)을 만족하는 θ_{res} 와 d_{opt} 의 정확한 값을 감쇠 최소 자승법을 이용하여 Ag, Al, Au, Cu 박막에 대해 계산한 결과가 Table 1에 수록되어 있다. 프리즘은 BK-7이고 기판은 공기일 경우 본 실험에서 사용한 488 nm와 참고용으로 632.8 nm에서 θ_{res} 와 d_{opt} 를 계산하였고, 각 금속 박막의 광학 상수는 American Institute of Physics Handbook^[20]에서 인용하였다. 488 nm에서 Ag 박막의 공명각은 44.80°이고 최적 두께는 59.4 nm이며, Al 박막의 공명각은 42.41°이고 최적 두께는 15.1 nm이다. 위의 방법은 입사 매질과 기판이 다른 매질이더라도 금속 박막에서 표면 플라즈몬 공명을 얻기 위한 방법으로 사용할 수 있다.

Table 1. Calculated optimum thickness and resonance angle for various thin metal films at 488 nm and 632.8 nm.

Wavelength	Film	<i>n</i>	<i>k</i>	<i>d</i> _{opt} (nm)	θ_{res} (deg)
488 nm (<i>n</i> ₁ = 1.522, <i>n</i> ₂ = 1.0)	Ag	0.051	2.78	59.4	44.80
	Al	0.63	5.45	15.1	42.41
	Au	0.91	1.85	31.8	51.41
	Cu	0.88	2.37	27.2	48.67
632.8 nm (<i>n</i> ₁ = 1.515, <i>n</i> ₂ = 1.0)	Ag	0.067	4.05	54.3	42.98
	Al	1.21	6.92	10.3	42.72
	Au	0.162	3.210	52.1	44.17
	Cu	0.157	3.367	50.7	43.88

III. 실험 장치 및 금속 박막 증착

표면 플라즈몬 공명을 측정하기 위한 실험 장치는 Fig. 4와 같다. 알곤 레이저(Spectra Physics M-165)의 두 파장(488 nm, 514.5 nm)을 선택하였으며 입사면에서 p-편광파가 형성되도록 Glan-Thompson 프리즘을 회전시켰다. 입사각은 분해능이 20초인 회전대를 사용하여 변화시켰으며 초퍼(EG&G 125A)로 레이저 광을 단속하였다. 프리즘 밑면의 금속 박막에서 감쇠된 빛의 반사율은 출력계(Spectra Physics Mo. 404), Lock-in 증폭기(EG&G 126)와 디지털 전압계로 측정하였다.

은 박막은 실온에서 5.0×10⁻⁶ torr인 진공 챔버 안의 기관 홀더에 프리즘을 올려놓고, 몰리브덴 보트에서 은을 녹여, 위에서 계산한 최적 두께가 되도록 프리즘에 증착하였다. 수정 두께 측정기(Edwards FTM 5)로 증착률은 약 1.0 nm/s, 두께는 약 60 nm이었다. 알루미늄 박막은 실온에서 5.0×10⁻⁶ torr인 진공 챔버의 텅스텐 보트에서 알루미늄을 녹여 프리즘에 증착하였으며, 수정 두께 측정기로 증착률은 약 1.0 nm/s, 두께는 약 17 nm이었다.

IV. 실험 결과 및 논의

은 박막과 알루미늄 박막의 표면 플라즈몬 공명을 488 nm와 514.5 nm의 두 파장에서 관측하였으며, 각 파장에 대하여 측정한 반사율과 식(1)-(13)을 이용하여 계산한 반사율이 일치하도록 감쇠 최소 자승법에 의한 곡선 맞춤으로 박막의 굴절률, 소멸 계수 및 두께를 결정하였다. 각 파장에 대하여 두 세트의 해가 존재하며, 이중 같은 두께를 갖는 해를 선택하여 박막의 유일한 광학상수와 두께를 결정하였다.

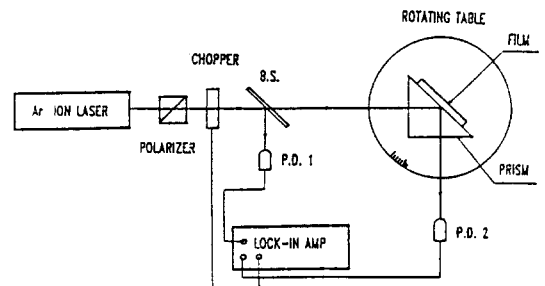


Fig. 4. Schematic diagram of surface plasmon resonance experiment.

1. 은 박막의 광학 상수

Fig. 5에 488 nm와 514.5 nm의 두 파장에서 관측한 표면 플라즈몬 공명의 반사율을 각각 점[x, +]으로 표시하였으며, 곡선 맞춤으로 구한 두 해를 Table 2에 수록하였다. 488 nm에서 표면 플라즈몬 공명이 일어난 각 (θ_m)은 44.25°이고, 두 세트의 해는 각각 굴절률 0.065, 소멸 계수 2.98, 두께 59.1 nm와 굴절률 0.043, 소멸 계수 2.99, 두께 53.1 nm이다. 두 해의 소멸 계수는 비슷하지만 굴절률과 두께에서는 차이가 많다. 514.5 nm에서의 θ_m 는 43.78°이고, 두 세트의 해(굴절률, 소멸계수, 두께)는 각각 0.069, 3.23, 58.9 nm와 0.044, 3.25, 51.3 nm이다.

두께는 파장에 무관하므로 각 파장에 대한 두 세트의 해 중 같은 두께를 갖는 해(59.1 nm와 58.9 nm)를 선택하였다. 선택한 두 해는 488 nm에서는 굴절률 0.065, 소멸계수 2.98, 두께 59.1 nm이며, 514.5 nm에서는 굴절률 0.069, 소멸계수 3.23, 두께 58.9 nm이다. Fig. 5의 점선과 실선은 각 파장에 대한 두 세트의 해 중 같은 두께를 갖는 해로부터 식(1)-(13)을 이용하여 계산한 반사율이며, 측정치와 잘 일치하고 있다.

Fig. 6은 488 nm 파장에 대하여 증착한 후 1시간 이내에 측정한 반사율 [x]과 같은 박막을 공기 중에 24 시간 노출 시킨 후 다시 측정한 반사율 [+]이다. 공기 중에 24 시간 노출시킨 후 표면 플라즈몬 공명각은 44.25

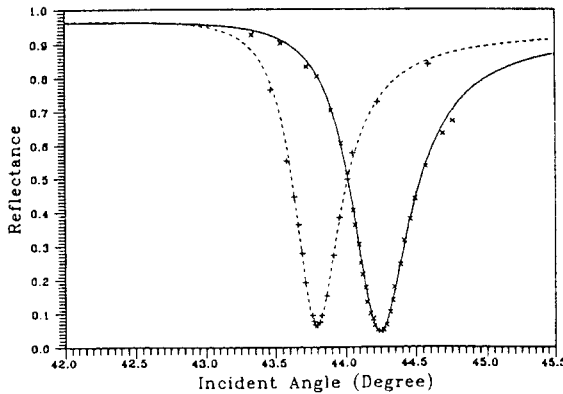


Fig. 5. Reflectance of Ag film vs incident angle at 488 nm and 514.5 nm.

- x ; reflectance measured at 488 nm
- + ; reflectance measured at 514.5 nm,
- reflectance calculated by the unique solution at 488 nm,
- reflectance calculated by the unique solution at 514.5 nm.

°에서 44.34°로 이동하였고 최저 반사율은 약 5% 증가하였으며, 이에 따른 광학 상수 및 두께의 변화는 굴절률은 0.075로 증가, 소멸 계수는 2.95로 감소, 두께는 60.4 nm로 약간 증가되었다(Table 2에서 Δ는 증착한지 1 시간 이내에 측정된 광학 상수와 24 시간 공기중에 노출한 후 측정된 광학 상수의 차이를 나타낸다).

이러한 미세한 광학 상수의 변화는 은 박막의 산화, 불순물, 습기 흡착등에 의한 박막의 표면 변화를 의미

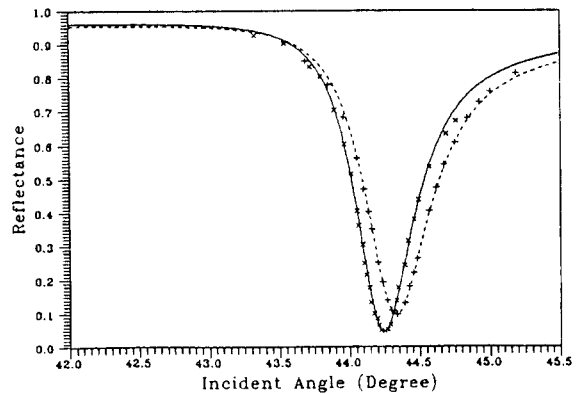


Fig. 6. Shift of surface plasmon resonance when the Ag film was exposed to the air for 24 hours.

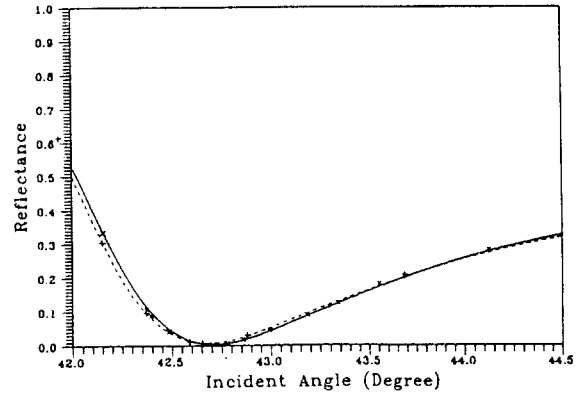


Fig. 7. Reflectance of Al film vs incident angle at 488 nm and 515.5 nm.

- x ; reflectance measured at 488 nm,
- + ; reflectance measured at 515.5 nm,
- reflectance calculated by the unique solution at 488 nm,
- reflectance calculated by the unique solution at 515.5 nm.

Table 2. Two sets of optical constants and thickness of Ag film and Al film at 488 nm and 514.5 nm measured within an hour after deposition. When the films were exposed to the air for 24 hours, the modified optical constants due to the shift of surface plasmon resonance were also determined at 488 nm. Δ is the difference in the optical constants between two cases.

Film	Wavelength	Optical constants	Solution 1 selected	Solution 2 unselected	After 24 hours	Δ
Ag	488 nm	n	0.065	0.043	0.075	0.01
		k	2.98	2.99	2.95	-0.03
		d (nm)	59.1	53.1	60.4	1.3
		θ_{rs} (deg)	44.25	44.25	44.34	0.09
	514.5 nm	n	0.069	0.044		
		k	3.23	3.25		
Al	488 nm	n	0.66	0.60	0.69	0.03
		k	4.83	4.96	4.60	-0.23
		d (nm)	17.7	15.8	18.3	0.61
		θ_{rs} (deg)	42.71	42.71	42.91	0.2
	514.5 nm	n	0.74	0.65		
		k	5.07	5.30		
		d (nm)	17.2	14.6		
		θ_{rs} (deg)	42.66	42.66		

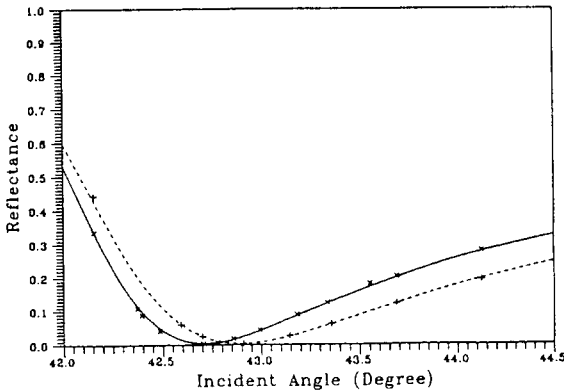


Fig. 8. Shift of surface plasmon resonance when the Al film was exposed to the air for 24 hours.

하며, 표면 플라즈몬 공명이 금속 박막의 표면 변화를 측정할 수 있는 좋은 방법임을 보여주고 있다. 박막의 두께 증가는 실제로 박막의 두께가 증가한 것이 아니라, 박막의 표면 변화가 균일한 박막으로 가정한 곡선 맞춤 과정 중에 나온 것으로 판단된다.

2. 알루미늄 박막의 광학 상수

알루미늄 박막도 488 nm[x]와 514.5 nm[+]의 두 파장에 대하여 위의 은박막과 동일한 방법으로 유일한 광학

상수를 결정하였다. 관측한 표면 플라즈몬 공명은 Fig. 7과 같으며, 공명 폭이 은 박막보다 매우 넓고 파장에 대한 공명각의 이동은 은 박막보다 작다.

Table 2에 두 파장에서의 광학 상수와 두께가 곡선 맞춤을 이용하여 계산되었다. 각 파장에 대한 두 세트의 해 중 같은 두께의 해는 488 nm의 파장에 대하여 굴절률은 0.66, 소멸계수 4.83, 두께 17.7 nm이고, 514.5 nm의 파장에 대하여 굴절률 0.74, 소멸계수 5.07, 두께 17.2 nm이다. Fig. 7의 점선과 실선은 각 파장에 대한 유일한 해로부터 계산한 반사율이며, 측정치와 잘 일치한다.

Fig. 8은 488 nm에 대해 증착한 후 1 시간 이내에 측정된 반사율 [x]과 같은 박막을 공기중에 24시간 노출시킨 후 다시 측정된 반사율 [+]이다. 표면 플라즈몬 공명각은 42.71°에서 42.91°로 이동하였으며, 이로부터 계산한 광학 상수는 Table 2에서와 같이 굴절률은 0.69로 증가하였고 소멸 계수는 4.60으로 감소하였다. 이러한 변화는 공기에 노출된 알루미늄 박막의 표면에 형성된 매우 얇은 산화막 때문이며, 24시간 지난 후 측정된 광학 상수는 이중 구조(알루미늄 박막+산화막)를 균일한 단층 박막으로 곡선 맞춤하기 때문에 나타난 유효 광학 상수로 판단된다.

V. 결 론

Kretschmann 구조를 이용한 표면 플라즈몬 공명에서 여러 금속 박막에 대해 반사율이 0이 되는 공명각과 최적 두께를 계산하였으며, 알콘 레이저의 두 파장 (488 nm와 515.5 nm)을 이용하여 은 박막과 알루미늄 박막에 대해 측정된 반사율과 계산한 반사율을 꼭신 맞추하여 두께가 같은 금속 박막의 유일한 광학 상수를 결정하였다. 은 박막의 굴절률, 소멸 계수, 두께는 488 nm에서 각각 0.065, 2.98, 59.1 nm이며 514.5 nm에서 0.069, 3.23, 58.9 nm이다. 알루미늄 박막의 굴절률, 소멸 계수, 두께는 488 nm에서 각각 0.66, 4.83, 17.7 nm이며, 514.5 nm에서는 0.74, 5.07, 17.2 nm이다. 또한 금속 박막을 공기 중에 24 시간 노출시킨 후 나타난 박막의 표면 변화를 표면 플라즈몬 공명각의 이동으로부터 관측하였으며, 변화된 광학 상수는 488 nm에서 은박막의 경우, 굴절률은 0.075 이고 소멸 계수는 2.95이며, 알루미늄 박막의 경우, 굴절률은 0.69이고 소멸 계수는 4.60이다

참 고 문 헌

- [1] H.A. Macleod, "Microstructure of Optical Thin Films," Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. **325**, 21 (1987).
- [2] F. Abeles, *Physics of Thin Films*, Vol. 6, (Academic Press, New York, 1971), pp. 151-204.
- [3] D.P. Arndt et al. "Multiple Determination of Optical Constants of Thin-Film Coating Materials," Appl. Opt. **23**, 3571 (1984).
- [4] 김상열, "Spectroscopic Ellipsometry를 이용한 표면 및 박막의 분석," 한국광학회지, **1**, 73 (1990).
- [5] H. Rather, *Physics of Thin Films*, Vol. 9, (Academic Press, New York, 1977), pp. 145-255.
- [6] H. Rather, *Surface plasmons on smooth and rough surfaces and on gratings*, (Springer-Verlag, New York, 1988).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] H.-S. Koh, G.-J. Lim, and J.I. Jin, "Measurements of Complex Dielectric Constants of a Phenylhydrazone Dye in Langmuir-Blodgett Films by the Attenuated Total Reflection Method," *J. Korean Phys. Soc.*, **13**, 131 (1990).
- [10] P.S. Wilson, "Determining Optical Properties of Thin Films by Modified Attenuated Total Reflection with a Charge Coupled Device," *J. Vac. Sci. Technol.*, **A6**, 2386 (1988).
- [11] 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).
- [12] C.K. Hwangbo, L.J. Lingg, J.P. Lehan, H.A. Macleod, J.L. Makous, and S.Y. Kim, "Ion Assisted Deposition of Thermally Evaporated Ag and Al Films," *Appl. Opt.*, **28**, 2769 (1989).
- [13] Y.J. Chen and G.M. Carter, "Measurement of Third Order Nonlinear Susceptibilities by Surface Plasmons," *Appl. Phys. Lett.*, **41**, 307 (1982).
- [14] 백문구, 고의관, 고도경, 이재형, 장준성, "장거리 표면 플라즈몬을 이용한 은-피리딘계에서의 표면 증강 산란," 한국광학회지, **1**, 142 (1990).
- [15] K. Matsubara, S. Kawata, and S. Minami, "Multi-layer System for a High-precision Surface Plasmon Resonance Sensor," *Opt. Lett.*, **15**, 75 (1990).
- [16] J. van Gent et al., "Optimization of a Chemo-optical Surface Plasmon Resonance Based Sensor," *Appl. Opt.*, **29**, 2843 (1990).
- [17] E. Fontana, R.H. Pantell, and S. Strober, "Surface Plasmon Immunoassay," *Appl. Opt.*, **29**, 4694 (1990).
- [18] H.A. Macleod, *Thin-Film Optical Filters*, 2nd Ed., (Adam Higler Ltd, Bristol, 1986).
- [19] H.A. Macleod, "Surface Plasmon Resonance Effects and its Admittance Diagram," *Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng.*, **777**, 300 (1987).
- [20] D.E. Gray, Ed., *American Institute of Physics Handbook*, Third Ed., (McGraw-Hill, New York, 1972) pp. 6.118-6.156.

**Determination of Optical Constants and Thickness of Thin Metal Films
by Measurement of Surface Plasmon Resonance**

Chang Kwon Hwangbo, Chul Chae Choi, and Tong Chull Chey
Department of Physics, College of Science, Inha University

(Received: February 22, 1991)

Resonance angle and optimum thickness of various thin metal films for surface plasmon resonance were calculated using an admittance diagram and optical constants and thickness of thin Ag films and Al films were determined by fitting the measured reflectance of surface plasmon resonance. Two wavelengths of an Ar ion laser were employed to select the unique optical constants which have the same thickness at two wavelengths. Also, when these films were exposed to the air, the shift of surface plasmon resonance was measured and the optical constants of modified thin films were determined.