

반사에 의한 편광상태의 변화를 최소화시키는 광학박막계의 설계*

한성홍 · 김석원

울산대학교 물리학과

(1996년 1월 8일 받음)

광파가 사각으로 입사할때 유전체층과 금속층에서 발생하는 편광상태의 변화를 분석하고, 이것을 이용하여 금속박막 양쪽에 각 한 층의 유전체 matching layer 를 두어 넓은 대역에서 편광상태의 변화를 최소화시키는 박막계를 설계하였다. 45도 입사에 대하여 기준파장($\lambda=550$ nm)을 중심으로 기준파장의 10% 파장대역($\Delta\lambda/\lambda=10\%$)에서 목표 반사율을 0.5와 0.6으로 하여 입사광파의 편광상태의 변화를 최소화시키는 광학박막계를 설계하였다.

I. 서 론

광파가 광학 경계면에 사각(斜角)으로 입사할 경우 편광에 따라 투과율과 반사율이 달라진다. 많은 경우에 이와 같은 편광현상은 바람직하지 못하며 이러한 효과를 줄이기 위해서 입사광의 편광에 의존하지 않는 비편광 광분리기가 설계되고 제작되어 왔다.^[1-5]

광분리기 설계에서도 고반사경이나 필터의 경우와 유사하게 높은 굴절률을 가지는 물질의 1/4파장 층(H)과 낮은 굴절률을 가지는 물질의 1/4파장 층(L)을 반복하여 코팅하는 방법을 이용하는데,^[6-9] 이 경우에는 이러한 H , L 외에 H 와 L 의 중간 굴절률을 가지는 매질(M)을 도입하여 H , M , L 의 적당한 조합을 이용하는 설계방법이 많이 이용되고 있다. Thelen^[10]은 1/4파장 층만을 이용하는 비편광 광분리기를 설계하였으며, Knittl 등^[11]은 사각에서 낮은 편광효과를 가지는 삼층 등가주기를 합성하는 설계법을 제안하였다. de Sterke 등^[1]은 최외각의 두층을 조절하여 최적화하는 방법으로 비편광 광분리기를 설계하였다.

많은 광학계에서는 넓은 파장의 범위에서 동작할 수 있는 광분리기를 필요로 한다.^[6-9] 만약 광흡수가 문제 되지 않는다면 금속-유전체 박막코팅이 적당하고 제작하기 쉬운 것이다. 본 논문에서는 유전체층과 금속층의

특성을 조사한 후, 유전체박막과 금속박막을 함께 이용하여, 광파가 45도로 입사할 경우에 각 편광에 따른 반사율을 조정하여 넓은 대역폭($\Delta\lambda/\lambda=10\%$)에서 반사에 의한 편광변화를 최소화시키는 광학박막계를 설계한다.

II. 광학박막계의 반사율과 투과율

기판 위에 m 층의 박막으로 구성된 그림 1과 같은 박막계를 생각하자. 이 박막계에 평면파가 입사할 때 공기층의 하단부에서의 입사전장과 반사전장의 크기를 각각 E_0^+ 와 E_0^- , j 번째 층의 하단부에서의 입사전장과 반사전장의 크기를 각각 E_j^+ 와 E_j^- , 기판 상단부에서의 입사전장의 크기를 E_{m+1}^+ 이라 표시하자. 여기서 기판 상단부에서의 반사전장이 없다고 가정하면, 즉 $E_{m+1}^- = 0$, 광학 다층박막 이론으로부터 다음 식을 얻는다.^[8,12]

$$\begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix} = \frac{E_{m+1}^+}{2U_0} \begin{pmatrix} U_0 B - C \\ U_0 B + C \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} B \\ C \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^m A_j \begin{pmatrix} 1 \\ U_{m-1} \end{pmatrix}$$

$$A_j = \begin{pmatrix} \cos g_j & iU_j^{-1} \sin g_j \\ iU_j \sin g_j & \cos g_j \end{pmatrix}$$

$$(j=1, 2, \dots, m, i=\sqrt{-1})$$

여기서 U_j 는, 굴절률 $N_j (=n_j - ik_j)$ 인 매질에서의 입사각

*이 논문은 1994학년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

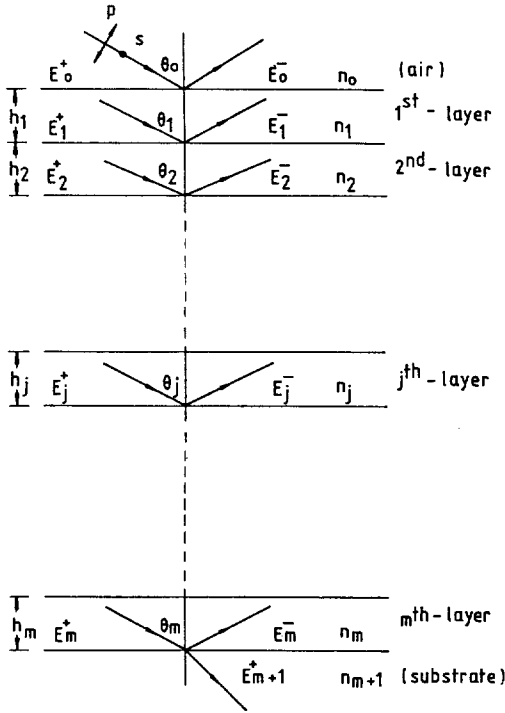


그림 1. 다층 박막계.

이 θ_j 일 때, j 번째 층에서의 애드미턴스(admittance)로서 S-편광에 대해서는 $U_j = N_j \cos \theta_j$, P-편광에 대해서는 $U_j = N_j / \cos \theta_j$ 가 되며, g_j 는 아래와 같이 표현된다.

$$g_j = \frac{2\pi}{\lambda} N_j g_j \cos \theta_j \quad (\lambda \text{는 입사파의 파장}) \quad (2)$$

애드미턴스 U_j 는 일반적으로 복소수이며, 흡수가 없는 입사 매질인 경우 U_0 는 실수이다.

(1) 식에 표현된 박막행렬 A_j 의 곱은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A = \prod_{j=1}^m A_j = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \quad (3)$$

그리고 (3)식을 (1)식에 대입하고 X 와 Y 를 다음과 같이 정의하면

$$\begin{aligned} X &= a_{11} U_0 + a_{12} U_0 U_{m+1} \\ Y &= a_{21} + a_{22} U_{m+1} \end{aligned} \quad (4)$$

(1)식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} X+Y \\ X-Y \end{pmatrix} \frac{E_{m+1}^+}{U_0} \quad (5)$$

따라서, 각 편극에서의 반사계수와 투과계수는 다음과 같이 표현된다.

$$r_{p,s} = \left(\frac{E_0^-}{E_0^+} \right)_{p,s} \quad (6)$$

$$t_{p,s} = \left(\frac{E_{m+1}^+}{E_0^+} \right)_{p,s}$$

여기서 첨자 P 와 S 는 각각 P-편광과 S-편광을 의미한다. 그리고, 각 편광에서의 반사율, 투과율, 흡수율 및 퍼텐셜 투과율을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R_{p,s} &= |r_{p,s}|^2, \\ T_{p,s} &= \frac{4Re(U_{m+1})}{U_0} |t_{p,s}|^2, \\ A_{p,s} &= 1 - R_{p,s} - T_{p,s} \\ &= \frac{4U_0 Re(BC^* - U_{m+1})}{(U_0 B + C)(U_0 B + C)^*}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Psi_{p,s} &= \frac{T_{p,s}}{1 - R_{p,s}} \\ &= \frac{Re(U_{m+1})}{Re(BC^*)} \end{aligned}$$

여기서 Re 는 실수를 의미한다.

III. 편광변화를 최소화하는 광분리기의 설계

1. 유전체 광분리기

그림 2는 수직입사의 경우 기준파장 550 nm를 중심으로 설계한 1/4파장의 광학적두께를 가지는 5층의 Airl LHLH2L|Glass(1.52) 구조를 가지는 광분리기의 성능이다. 여기서 높은 굴절률을 가지는 물질의 굴절률(n_H)은 2.35, 낮은 굴절률을 가지는 물질의 굴절률(n_L)은 1.38이다. 이 설계의 결과를 그림에서 실선으로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 입사파는 기준파장 위치에서 약 50%의 반사율($R=50\%$)로 분리됨을 알 수 있다. 또한 그림 2에는 45도 입사때의 S-편광과 P-편광의 반사율도 각각 나타내었다. 45도 입사때 각 편광의 반사율이 서로 크게 다르고 수직입사 때의 반사율인 50%에서 크게 벗어남을 알 수 있다.

2. 금속박막의 편광효과

금속박막의 편광효과를 이해하기 위해 먼저 공기-유리

경계면에서의 입사각에 따른 각 편광의 반사율을 그림 3(a)에 나타내었다. 그림에서 보듯이 입사각이 증가할수록 브루스트각(56.7도)에 도달할 때까지 P-편광의 반사

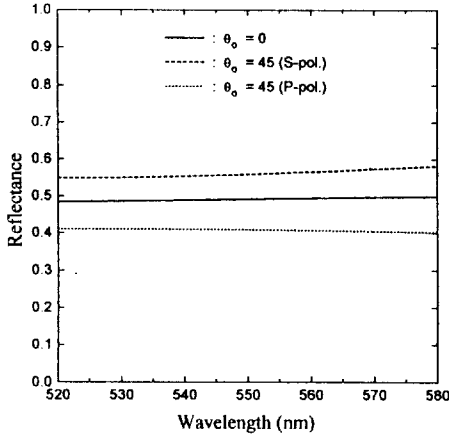
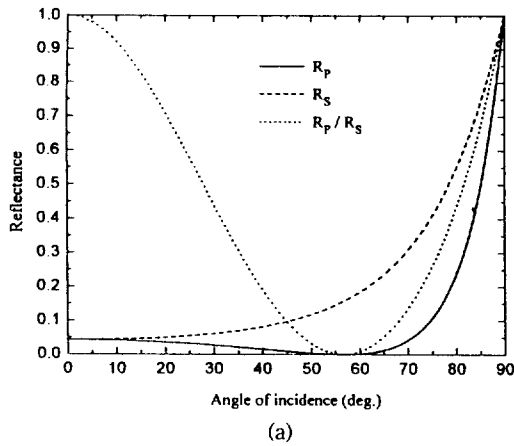


그림 2. 광속분리기.

$1.0|LHLH2L|1.52, R=50\%, n_L=1.38, n_H=2.35.$



율은 감소하였다가 브루스트각 이후에는 증가한다. 반면 S-편광의 반사율은 입사각이 증가할수록 점점 빠르게 1에 접근한다. 따라서, 수직입사가 아닌 경우 두 편광의 반사율의 비는 1에서 크게 벗어난다. 즉, 입사각이 약 10도 이상일 경우 유전체 경계면에 입사한 광은 반사후 편광상태가 크게 달라짐을 알 수 있다.

표 1은 공기-금속 경계면과 유리-금속 경계면의 반사특성을 나타낸 것이다. 표에서 보듯이 공기-은, 공기-알루미늄, 공기-구리, 공기-금들의 경계면에서 수직입사일 때의 반사율이 각각 0.9848, 0.9027, 0.9014, 0.9020 이며, 45도 입사일 때의 두 편광에 대한 반사율의 비가 각각 0.9894, 0.9307, 0.9312, 0.9323 이다. 그리고 유리-은, 유리-알루미늄, 유리-구리, 유리-금들의 경계면에서 수직입사일 때의 반사율은 각각 0.9785, 0.8602, 0.8704, 0.8768 이며, 45도 입사일 때의 두 편광에 대한 반사율의 비는 각각 0.9852, 0.9005, 0.9120, 0.9087 이다.

이들 특성을 그림 3(a)의 성능과 비교하여 보면 금속면에서는 유전체면에 비하여 상대적으로 반사율이 크며, 반사광의 편광효과가 상대적으로 작다. 그리고 그림 3(b)

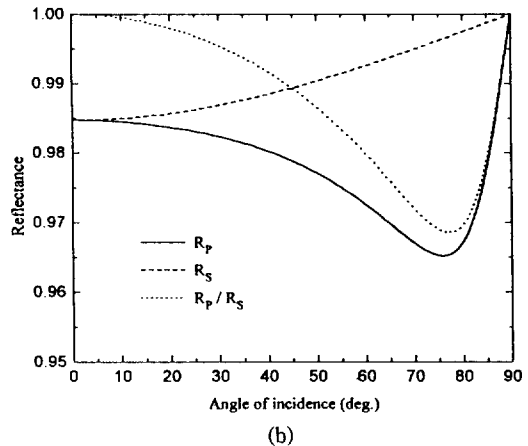


그림 3. (a) 공기-유리 경계면에서의 입사각에 따른 각 편광의 반사율.

(b) 공기-은 경계면에서의 입사각에 따른 각 편광의 반사율.

표 1. 공기-금속 경계면과 유리-금속 경계면의 반사특성

	공기-금속경계면				유리-금속경계면			
	수직입사 R	45도 입사 Rp	45도 입사 Rs	45도 입사 Rp/Rs	수직입사 R	45도 입사 Rp	45도 입사 Rs	45도 입사 Rp/Rs
Ag	0.9848	0.9788	0.9893	0.9894	0.9785	0.9706	0.9852	0.9852
Al	0.9027	0.8661	0.9306	0.9307	0.8602	0.8108	0.9004	0.9005
Cu	0.9014	0.8670	0.9311	0.9312	0.8704	0.8317	0.9120	0.9120
Au	0.9020	0.8693	0.9324	0.9323	0.8768	0.8437	0.9186	0.9087

은 공기-은 경계면에서의 입사각에 따른 각 편광의 반사율을 그린 것이다. 그림에서 보듯이 입사각이 증가할수록 유사브루스텍각(76.8도)에 도달할 때까지 P-편광의 반사율은 0.9651까지 감소하다가 유사브루스텍각 이후에는 증가한다. 반면 S-편광의 반사율은 입사각이 증가할수록 1에 접근한다. 따라서, 두 편광의 반사율의 비는 0.9686 이상임을 알 수 있다. 즉, 반사광의 편광효과가 상대적으로 작음을 알 수 있다. 표 1에서 보듯이 은의 경계면에서의 반사율이 다른 금속의 경계면에서의 반사율보다 크며, 반사광의 편광효과가 상대적으로 작음을 알 수 있다.

금속박막의 복소굴절률은 $n-ik$ 로 표현한다. 여기서, i 는 허수, n 은 굴절률이고 k 는 소광계수(extinction coefficient)이다. 상대적으로 k 가 크므로 반사율이 크게 되어, 유사브루스텍 효과를 보이지만 반사에 의한 편광효과가 유전체 만큼 크지 않다. 유전체박막의 성능은 위상두께 $2\pi nh/\lambda$ 에 의하여 결정되므로 주어진 파장에서는 광학적두께 nh 가 중요한 역할을 한다. 금속박막의 n 이 매우 작기 때문에 위상두께 nh 가 매우 작다. 그래서 금속내에서 파들은 에바네스цент 파(evanescent wave)의 특성을 나타내며 위상두께와 비슷한 형태인 $2\pi kh/\lambda$ 에 의해 성질이 결정된다. 금속 박막층은 편광에 의한 영향을 적게 받지만 유전체 박막층보다 더 많은 손실을 가지므로 한개의 금속박막층을 사용한 박막계를 선택하기로 한다.

금속박막의 두께가 두꺼우면 반사율이 너무 크게 되므로 먼저 금속박막중 편광변화가 상대적으로 작은 은을 택하여 Ag박막의 두께에 따른 반사율을 구하였다. 그림 4는 Glass|TiO₂|Ag|Glass 계의 수직입사 때의 반사율과

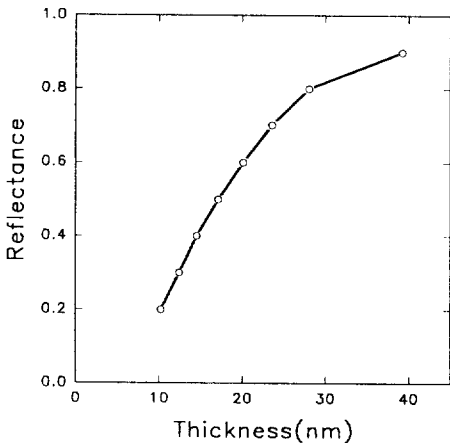


그림 4. 수직으로 입사할 때 Glass|TiO₂|Ag|Glass계의 Ag 박막의 두께와 반사율과의 관계.

Ag박막두께와의 관계를 계산한 것이다. 반사율이 40%, 50%, 60%일 때 Ag 박막의 두께가 각각 14.50 nm, 17.09 nm, 20.11 nm이다.

3. 편광변화를 최소화하는 광분리기의 설계

Ag 박막과 유리 사이에 매칭층(matching layer)를 삽입하여 Glass|TiO₂|Ag|TiO₂|Glass형의 박막계를 택하고, 초기조건으로 2절의 결과를 사용하고 아래와 같이 메리트함수(merit function)를 만들어 감쇄최소자승법을 이용하여 편광변화를 최소화시키는 광분리기를 설계하였다.

앞 절에서 각 편광에 대하여 구한 반사율과 투과율을 이용하여, 이제 우리가 바라는 성능을 갖는 박막계의 메리트함수 m 을 다음과 같이 정의하자.

$$m = \sum_{j=1}^l f_j^2 = F^T F \tag{8}$$

단,

$$f_j = w_j (R_p(X) - R_s(X)),$$

$$j = 1, 2, \dots, l/2 \text{ 일 때}$$

$$f_j = w_j ((R_p(X) + R_s(X))/2 - R^*),$$

$$j = l/2 + 1, l/2 + 2, \dots, l \text{ 일 때}$$

이다. 여기서, l 은 구하고자 하는 파장의 수, w_j 는 가중치, X 는 설계변수, R_p 와 R_s , R^* 는 각 파장에서 구해야 하는 각 편광에 대한 반사율과 반사율의 목표값이다. 그리고 대문자는 vector 또는 행렬을, 소문자는 스칼라량을 표시하며 T 는 전치벡터 또는 전치행렬을 표시한다. 수렴 속도를 빠르게 하고 국소 최소값에 잘 빠지지 않게 하기 위해 F 를 2계 미분 도함수를 이용하여 선형화하여 최적설계하였다.^[13]

3.1 Design 예($R^*=0.5$ 일 때)

45도 사각 입사에 대하여 기준파장 550 nm를 중심으로 기준파장의 10% 파장대역에서 편광변화를 억제시키는 광분리기를 Ag 박막과 유리 사이에 매칭층을 삽입하여 Glass|TiO₂|Ag|TiO₂|Glass형 구조로 설계하였다. 목표반사율을 0.5로 두고 설계한 박막계의 각 편광의 반사율을 그림 5에 각각 도시하였다. 박막의 두께는 Ag 박막이 20.97 nm, TiO₂ 박막이 각각 22.50 nm와 20.76 nm이다. 기준파장 550 nm에서 P-편광의 반사율 R_p 가 0.4995이고 S-편광의 반사율 R_s 가 0.4999이며, 두 반사광의 진폭비는 0.9996이다. 그리고 도시된 파장대역내에서 R_p 는 0.029 이내의 차이로 R_s 는 0.015 이내의 차이로 목표값에 접근하고 있다. 기준파장의 10% 이내의 파장대역에서 두 반사광의 진폭비도 0.013 이내의 차이로 1에 접근하고 있다.

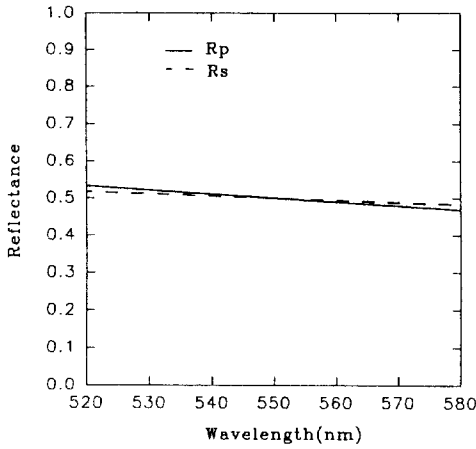


그림 5. 비편광 광속분리기, Glass|TiO₂|Ag|TiO₂|Glass, R'=0.5의 분광반사율.

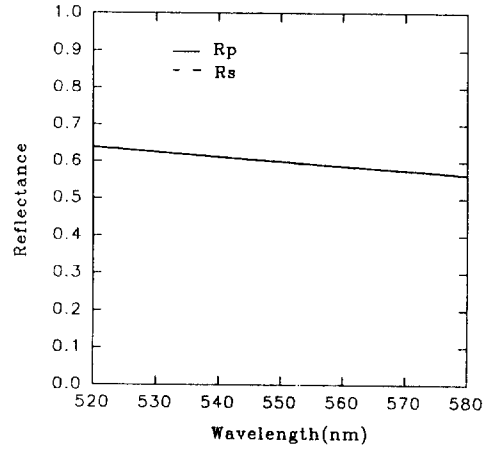


그림 7. 비편광 광속분리기, Glass|TiO₂|Ag|TiO₂|Glass, R'=0.6의 분광반사율.

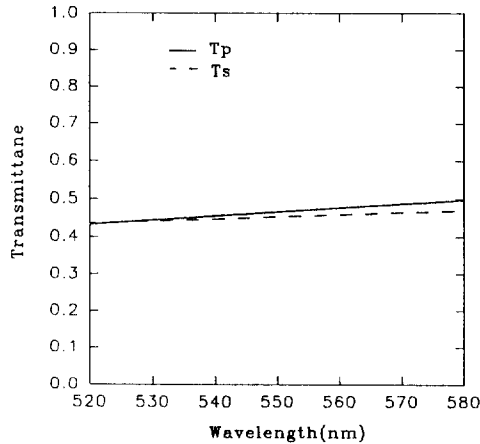


그림 6. 비편광 광속분리기, Glass|TiO₂|Ag|TiO₂|Glass, R'=0.5의 분광투과율.

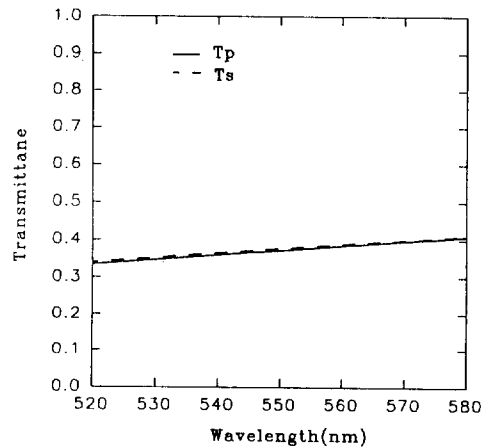


그림 8. 비편광 광속분리기, Glass|TiO₂|Ag|TiO₂|Glass, R'=0.6의 분광투과율.

그리고 설계된 박막계의 각 편광의 투과율을 그림 6에 도시하였다. 기준파장에서 P-편광의 투과율 T_p 가 0.4667이고 S-편광의 투과율 T_s 가 0.4529이며, 두 투과율의 진폭비는 1.015이다. 그리고 T_p 는 0.4360과 0.4957사이 값을, T_s 는 0.4367과 0.4692사이 값을 나타낸다. 기준파장의 10% 내의 파장대역에서 두 투과율의 진폭비는 1.0000에서 1.0273사이의 값을 나타낸다.

또한 박막계의 P-편광의 흡수율 A_p 는 기준파장에서 0.0338이며 파장대역내에서 0.0005 이내의 차이로 일정하고, S-편광의 흡수율 A_s 는 기준파장에서 0.0473이며 파장대역내에서 0.0005 이내의 차이로 일정하다.

그리고 P-편광의 퍼텐셜 투과율 Ψ_p 는 중심파장에서 0.9328이고 파장대역 내에서 0.0050 차이 이내의 값을

가지며, S-편광의 퍼텐셜 투과율 Ψ_s 는 기준파장에서 0.9055이고 파장대역내에서 0.0040 차이 이내의 값을 갖는다.

3.2 Design 예 ($R_r=0.6$ 일 때)

위와 같은 조건으로 기준파장에서의 목표 반사율을 0.6으로 하여 설계하였다. 박막의 두께는 Ag 박막이 23.34 nm, TiO₂ 박막이 각각 11.10 nm와 38.90 nm이다. 설계된 박막계의 각 편광의 반사율을 그림 7에 각각 도시하였다. 기준파장 550 nm에서 P-편광의 반사율 R_p 가 0.5997이고 S-편광의 반사율 R_s 가 0.5994이며, 두 반사율의 진폭비는 1.0003이다. 그리고 도시된 파장대역내에서 R_p 는 0.034 이내의 차이로, R_s 는 0.035 이내의 차이로 목표값에 접근하고 있다. 기준파장의 10% 이내의 파장

대역에서 두 반사광의 진폭비도 0.001 이내의 차이로 1에 접근하고 있다.

그리고 설계된 박막계의 각 편광의 투과율을 그림 8에 도시하였다. 기준파장에서 P-편광의 투과율 T_p 가 0.3726이고 S-편광의 투과율 T_s 가 0.3770이며, 두 투과광의 진폭비는 0.9941이다. 그리고 T_p 는 0.3380과 0.4040사이 값을, T_s 는 0.3430과 0.4067사이 값을 나타내고 있다. 이 경우 투과율의 특성이 반사율이 0.6으로 설계한 경우에 비해 상대적으로 좋지 않다. 기준파장의 10%내의 파장대역에서 두 투과광의 진폭비는 0.9926에서 0.9980사이의 값을 나타낸다.

또한 박막계의 P-편광의 흡수율 A_p 는 기준파장에서 0.0277이며 파장대역내에서 0.0001 이내의 차이로 일정하고, S-편광의 흡수율 A_s 는 기준파장에서 0.0236이며 파장대역내에서 0.0015 이내의 차이로 일정하다.

그리고 P-편광의 퍼텐셜 투과율 Ψ_p 는 기준파장에서 0.9308이고 파장대역내에서 0.007차이 이내의 값을 가지며, S-편광의 퍼텐셜 투과율 Ψ_s 는 기준파장에서 0.9410이고 파장대역내에서 0.001 차이 이내의 값을 갖는다.

IV. 결 과

본 연구에서는 금속박막 한층을 선택하고, 원하는 반사율에 맞게 금속박막 두께의 초기값을 구한 후, 금속박막 양쪽에 각 한 층의 유전체 매칭층을 두어 편광변화를 최소화시키는 광학박막계를 설계하였다.

45도 입사에 대하여 기준파장 550 nm를 중심으로 기준파장의 10% 파장대역에서 목표값 R_t 를 0.5로 하여, 금속박막과 유전체박막으로 각각 Ag박막과 TiO_2 박막을 사용하여 Glass| TiO_2 |Ag| TiO_2 |Glass형 구조로 박막계를 설계하였는데, 박막의 두께는 Ag 박막이 20.97 nm, TiO_2 박막이 각각 22.50 nm와 20.76 nm이었다. 기준파장에서 반사율 R_p 와 R_s 가 각각 0.4995와 0.4999, 투과율 T_p 와 T_s 가 각각 0.4667과 0.4529, 흡수율 A_p 와 A_s 가 각각 0.0338와 0.0473, 퍼텐셜 투과율 Ψ_p 와 Ψ_s 가 각각 0.9328과 0.9055이었으며, 두 반사광의 진폭비는 0.9996이고 두 투과광의 진폭비는 1.015로 나타났다. 그리고, 파장대역내에서, R_p 는 0.029 이내의 차이로 R_s 는 0.015 이내의 차이로 목표값에 접근하였으며, T_p 는 0.4360과 0.4957사이 값을 T_s 는 0.4367과 0.4692사이 값을 나타내었으며, 두 반사광의 진폭비도 거의 1에 접근하였고 두 투과광의 진폭비는 1.000에서 1.0273 사이의 값을 나타내었다. 또한 A_p , A_s , Ψ_p , Ψ_s 들도 거의 일정한 값을 보였다.

또한, 위와 같은조건으로 기준파장에서의 목표반사율

R_t 를 0.6으로 하여 설계하였다. 박막의 두께는 Ag 박막이 23.34 nm, TiO_2 박막이 각각 11.10 nm와 38.90 nm이었다. 기준파장에서 반사율 R_p 와 R_s 가 각각 0.5997과 0.5994, 투과율 T_p 와 T_s 가 각각 0.3726과 0.3770, 흡수율 A_p 와 A_s 가 각각 0.0277과 0.0236, 퍼텐셜 투과율 Ψ_p 와 Ψ_s 가 각각 0.9308과 0.9410이었으며, 두 반사광의 진폭비는 1.003이고 두 투과광의 진폭비는 0.9941이었다. 그리고, 파장대역내에서, R_p 는 0.034 이내의 차이로 R_s 는 0.035 이내의 차이로 목표값에 접근하였으며, T_p 는 0.3880와 0.4040 사이 값을 T_s 는 0.3430과 0.4067 사이 값을 나타내었고, 두 반사광의 진폭비도 거의 1에 접근하였고 두 투과광의 진폭비는 0.9926에서 0.9980 사이의 값을 나타내었다. 또한 A_p , A_s , Ψ_p , Ψ_s 들도 각각 0.0001, 0.0015, 0.0070, 0.0010 이내의 차이로 거의 일정하였다.

V. 결 론

본 연구에서는 경계면에 사각으로 광파가 입사할때 유전체층과 금속층에서 발생하는 편광상태의 변화를 분석하고, 금속박막과 유전체박막의 특성을 고려하여 금속박막 양쪽에 각 한 층의 유전체 매칭층을 두어 유전체박막과 금속박막을 함께 이용하여 사각으로 입사할때 일어나는 편광상태의 변화를 넓은 파장대역에서 최소화시키는 박막계를 설계하였다. 45도 사각 입사에 대하여 기준파장 550 nm를 중심으로 기준파장의 10% 파장대역에서 목표 반사율을 0.5와 0.6으로 하여 설계한 결과 만족한 결과를 얻었다. 그러나 목표반사율이 0.6인 경우의 투과율 특성이 목표반사율이 0.5인 경우에 비해 상대적으로 좋지 않았다.

참 고 문 헌

- [1] C. M. de Sterke, C. J. van der Lann, and H. J. Frankena, *Appl. Opt.* **22**, 595 (1983).
- [2] P. Baumeister, *Opt. Acta.* **8**, 105 (1961).
- [3] V. R. Costich, *Appl. Opt.* **9**, 866 (1970).
- [4] M. Gilo, *Appl. Opt.* **31**, 5345 (1992).
- [5] 한성홍, 김석원, 최양오, 나승유, *한국광학회지*, **4**, 162(1993).
- [6] A. Thelen, *Design of Optical Interference Coating* (McGraw-Hill, New York, 1989) pp. 110-122.
- [7] Z. Knittl, *Optics of Thin-films* (John Wiley & Sons, London, 1979), pp. 384-405.
- [8] H. A. Macleod, *Thin-film Optical Filters* (American Elsevier, New York, 1986), pp.148-156.

- [9] M. Zukic and K. H. Guenther, *Opt. Eng.* **28**, 165 (1989). (1982).
[12] 한성홍, 이상수, *새물리*, **23**, 155(1983).
[10] A. Thelen, *Appl. Opt.* **15**, 2983(1976). [13] 이종웅, 석사학위 청구논문, 한국과학기술원(1985).
[11] Z. Knittl, H. Houserkova, *Appl. Opt.* **21**, 2055

Design of Optical Thin Film Systems Reducing the Variation of Polarization State

Sung Hong Hahn and Sok Won Kim
University of Ulsan, Department of Physics, Ulsan 680-749, Korea

(Received: January 8, 1996)

At oblique angles of incidence, polarization properties of metal layers and dielectric layers are investigated and we designed the optical thin film systems reducing the variation of the polarization state, for target reflectances 0.5 and 0.6 at 45° incidence in broad band wavelength regions ($\Delta\lambda/\lambda=10\%$) using two dielectric matching layers and one metal layer.