

## 전반사형 박막계를 이용한 레이저 광파 편극의 변조

한 성 홍

물리학과

### <요 약>

위상변위차를 보정하고 편극상태를 유지시키는 박막계를 설계하였다. 맥스웰 방정식으로 부터 유도된 박막 이론을 이용하여, 전반사에 대한 admittance를 유도하고 편극상태와 관계되는 반사계수들의 비에 대해 논의했다. 이 결과로부터 He-Ne 레이저 파장에 대해, 고반사를 주면서 위상변위차를 보정하는 전반사형 박막계로, 유리( $n_0=1.80$ )-MgF<sub>2</sub>-공기박막계(유전체 한층 박막계)와 유리( $n_0=1.52$ )-ZnS-MgF<sub>2</sub>-공기계를 설계했다.

## Optical phase modulation by total reflecting thin film system

Hahn, Sung Hong

Dept. of Physics

### <ABSTRACT>

We designed the optical thin film systems correcting the differential phase shift and preserving the state of polarization.

We used the thin film matrix representation derived from Maxwell equations. And we derived the complex admittances, which is the generalized refractive indices, for total internal reflection. The ratio of the parallel and perpendicular components of the electric field, which is related to the state of polarization, is discussed. From these results, total reflection in thin film system is useful in correcting differential phase shift and giving high reflectance. Glass( $n_0=1.80$ )-MgF<sub>2</sub>-air system(case of one dielectric film) and glass( $n_0=1.52$ )-ZnS-MgF<sub>2</sub>-air system(case of two dielectric films) are designed in order to preserve polarization at the wavelength of the He-Ne laser beam.

### I. 서 론

유전체나 금속면에 사각으로 광파가 입사하여 반사될 때, P편극과 S편극에 대한 위상변위(phase

shift)가 입사각에 따라 각각 다르게 변하므로 위상변위차(differential phase shift)도, 입사각에 따라 변하게 되어 광파의 편극상태(polarization state)가 변하게 된다.<sup>1-2)</sup> 최근 이러한 편극 상태의 변화에 대해서 많은 관심을 가지게 되었다.<sup>3-5)</sup> 특히 환경

이득 영역을 포함하고 있는 레이저계에 이용되고 있는 conical element에서 광파가 반사될 때 편극상태가 문제된다.<sup>3,6-9)</sup> Fink는 waxicon에서 두개의 입사각을 조절함으로써 편극상태를 유지시키려 했으며,<sup>10)</sup> Dente는 이러한 공진기(resonator)의 모드구조(mode structure) 편극 효과에 대해서 언급했다.<sup>11)</sup> Kawabata와 Suzuki는 금속 박막위에 유전체 1층으로 구성된 박막계가 주어진 입사각에 따라 위상변위차의 폭을 늘릴 수 있는 사실을 이용하여, 이런 박막계에서 유전체 박막의 최적두께를 선택하여 입사각에 따라 위상변위차를 연속적으로 변화시켜 줄 수 있음을 보였다.<sup>12)</sup> Southwell은 금속위에 유전체 다층 박막이 있는 박막계를 이용하여 90° 위상변위차 박막계를 설계하였다.<sup>13-14)</sup> Azzam은 금속위에 유전체 1층을 쌓아, waxicon에서 발생하는 광파의 편극 상태 변화를 보정했으며, 또한 편극상태를 유지시킨 채 빛을 평행하게 이동시키는 beam displacer 등을 설계했다.<sup>15-17)</sup> 나아가 Bloom<sup>18)</sup>과 Apfel<sup>19-20)</sup> 유전체 다층 박막을 이용하여 광파의 편극상태를 조절할 수 있음을 보였다. 그리고 Guha는 회절공진기에서 발생하는 광파의 편극상태 변화를 박막계를 이용하여 보정하는 것을 실험적으로 보였다.<sup>21)</sup> 한편 전반사 유전체 박막을 이용하여 광파의 편극상태를 조절하기도 했다.<sup>22-25)</sup>

본 연구에서는 2장에서 박막이론을 정리하고, 박막계산에서 필수적으로 요구되는 admittance를 전반사의 경우에 대해서 유도한다. 3장에서는 유전체 공진기에서의 전반사에 의한 위상변위차의 특성을 조사한다. 그리고 4장에서는 유리와 공기 사이에 유전체 1층으로 이루어진 박막계에서 광파가 반사될 때 위상변화를 조사하고, 이 결과를 이용하여 위상변위차 보정 박막계를 설계한다. 그리고 특별한 위상 변위차를 갖는 위상변위차 박막계를 설계할 수 있음을 보인다. 그리고 나아가 유리-2층 유전체박막-공기계에서 전반사에 의한 위상변위차를, 유리와 박막의 굴절율 그리고 박막의 두께 변화에 따라, 조사하고 이 결과를 이용하여 유리기판 위에 유전체 2층으로 이루어진 전반사 박막계를 사용하여 위상변위차를 보정하는 박막계를 설계한다.

## II. 박막이론<sup>5)</sup>

### 1. 박막행렬

그림1과 같이 양쪽으로 두꺼운 물질 사이에  $n$ 층의 다층박막이 있는 박막계를 생각하자. 다층박막은  $y-z$  평면에 무한히 평행한 층들로 되어 있고 각 층을 이루고 있는 박막 매질이 균질성과 등반성을 지니고 있다고 하자. 이 박막계에 전장이  $E$ 인 평면파가 입사할 때 입사 매질 하단부에서의 입사전장과 반사전장의 크기를 각각  $E_0^+$ 와  $E_0^-$ ,  $j$ 번째 층의 하단부에서의 입사전장과 반사전장의 크기를 각각  $E_j^+$ 와  $E_j^-$ , 그리고 아래쪽 두꺼운 매질에서의 입사전장의 크기를  $E_{m+1}^+$ 이라 하자. 단  $E_{m+1}^- = 0$ 이다. 이때 박막행렬 이론으로부터 다음식을 얻을 수 있다.

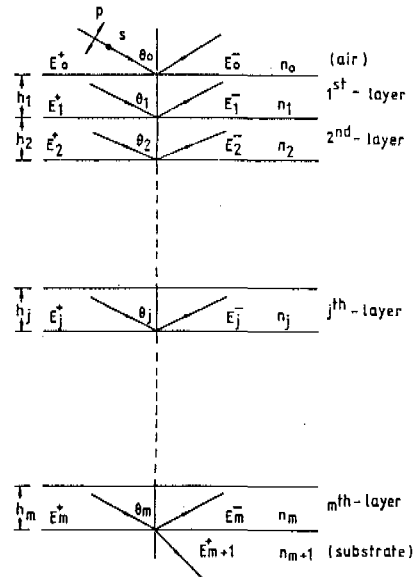


Fig.1. Electric fields in the thin film system.

$$\begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & Y_0^{-1} \\ 1 & -Y_0^{-1} \end{pmatrix} \prod_{j=1}^m A_j \begin{pmatrix} 1 \\ Y_{m+1} \end{pmatrix} E_{m+1}^+ \quad (1)$$

여기서

$$A_j = \begin{pmatrix} \cos \phi_j & i Y_j^{-1} \sin \phi_j \\ i Y_j \sin \phi_j & \cos \phi_j \end{pmatrix} \quad (2)$$

로 주어진다.  $\phi_j$ 는 파장이  $\lambda$ 인 광파가  $j$ 번째 층을 통과하는 동안 기하학적 두께  $h_j$ 에 의해 생긴 위상 변화이다.

$$\phi_j = \frac{2\pi}{\lambda} n_j h_j \cos \theta_j \quad (3)$$

그리고  $Y_j$ 는  $j$ 번째 층에서의 admittance(generalized refractive index)로 다음과 같이 주어진다.

$$Y_j = \begin{cases} n_j \sec \theta_j & (\text{p 편극}) \\ n_j \cos \theta_j & (\text{s 편극}) \end{cases} \quad (4)$$

### 2. 전반사계에서의 admittance

광파가 굴절률이  $n_0$ 인 물질에서  $\theta_0$ 의 각도로 굴절률  $n_1$  ( $n_0$ )인 물질에 입사하는 경우 Snell의 법칙으로부터

$$n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 \quad (n_1 < n_0) \quad (5)$$

$$\cos^2 \theta_1 = 1 - (n_0/n_1)^2 \sin^2 \theta_0 \quad (6)$$

을 얻는다. 이때 임계각(critical angle)을  $\theta_c$ 로 두자.  $\theta_0$ 가  $\theta_c$ 보다 클때 전반사가 일어나며  $\cos \theta_1$ 은 복소수가 된다. 즉,

$$\cos \theta_1 = \pm \sqrt{1 - (n_0/n_1)^2 \sin^2 \theta_0} = \pm i r \quad (7)$$

$$r = \sqrt{(n_0/n_1)^2 \sin^2 \theta_0 - 1} \quad (> 0) \quad (8)$$

이코 감쇄를 고려하여 음의 부호를 취하면

$$\cos \bar{\theta}_1 = -i r \quad (9)$$

가 된다. 따라서 전반사가 일어날 경우 admittance  $Y_1$ 은 각 편극에 대해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$Y_1 = \begin{cases} i n_1 / r & \text{p 편극} \\ -i n_1 r & \text{s 편극} \end{cases} \quad (10)$$

### 3. 위상변위차의 계산

그림1에서  $m$ 번째층과  $(m+1)$ 번째층 사이의 경계면에서 전반사가 일어나는 경우  $(m+1)$ 층에서의 admittance는 복소수가 되므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Y_{m+1} = Y_R + i Y_I \quad (11)$$

여기서  $Y_R$ 과  $Y_I$ 는 실수이다. 식(1)에서  $m$ 개의  $j$ 번째 유전체 박막에 대한 행렬  $A_j$  ( $j=1, 2, \dots, m$ )의 대각요소들은 실수이고 나머지 요소들은 허수이므로, 행렬들의 곱의 결과를 다음과 같이 들 수 있다.

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

( $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}$ 는 모두 실수)

이제 식(12)를 식(1)에 대입하고  $M_{kl}$  ( $k, l=1, 2$ )을 아래와 같이 치환하면

$$\begin{aligned} M_{11} &= Y_0 a_{11} + Y_R a_{22} - Y_0 Y_I a_{12} \\ M_{21} &= Y_0 a_{11} - Y_R a_{22} - Y_0 Y_I a_{12} \\ M_{12} &= a_{21} + Y_0 Y_R a_{12} + Y_I a_{22} \\ M_{22} &= -a_{21} + Y_0 Y_R a_{12} - Y_I a_{22} \end{aligned} \quad (13)$$

식(1)은 다음과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix} = \frac{1}{2 Y_0} \begin{pmatrix} M_{11} + i M_{12} \\ M_{21} + i M_{22} \end{pmatrix} E^{x_{m+1}} \quad (14)$$

따라서 식(9)를 이용하여 각 편극에 대한 반사계수 ( $r_p, r_s$ )를 구할 수 있다.

즉,

$$r_p = - \left( \frac{E_0^-}{E_0^+} \right)_p = - \left( \frac{M_{21} + i M_{22}}{M_{11} + i M_{12}} \right)_p = |r_p| e^{i \delta_p} \quad (15)$$

$$r_s = \left( \frac{E_0^-}{E_0^+} \right)_s = \left( \frac{M_{21} + i M_{22}}{M_{11} + i M_{12}} \right)_s = |r_s| e^{i \delta_s} \quad (16)$$

그리고 이들로 부터 반사계수의 비  $\rho$ 를 구할 수 있다.

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = |\rho| \exp(i \delta) \quad (17)$$

따라서 식(14)~(17)로 부터 각 편극에 대한 위상변위차를 구할 수 있으며 이들의 차이 위상변위차도 구할 수 있다.

$$\delta_p = \tan^{-1} \left( \frac{M_{11} M_{22} - M_{12} M_{21}}{M_{11} M_{21} + M_{12} M_{22}} \right)_p + \pi \quad (18)$$

$$\delta_s = \tan^{-1} \left( \frac{M_{11} M_{22} - M_{12} M_{21}}{M_{11} M_{21} - M_{12} M_{22}} \right)_s \quad (19)$$

$$\delta = \arg(\rho) = \delta_p - \delta_s \tag{20}$$

여기서 밑줄자 P와 S는 편극상태를 표시한다.

### III. 유전체-공기계에서의 전반사에 의한 위상변위차

광파가 굴절율이 큰 매질에서 굴절율이 작은 매질로 진행할 때, 임계각보다 큰 각으로 입사할 경우 전반사가 일어난다. 그림2는 유리( $n_0=1.52$ , BK-7)<sup>20)</sup>에서 공기( $n_1=1.0$ )로 광파가 진행할 경우 입사각  $\theta_0$ 의 변화에 따른 위상변위차  $\delta$ 를 도시한 것이다. 그림에서 보듯이 입사각이 증가함에 따라  $\delta$ 가 일정값  $180^\circ$ 를 유지하나 Brewster 각 [ $\tan^{-1}(n_1/n_0)$ ]를 지나면서  $r_p$ 의 부호가 변하게 되어  $\delta$ 가  $0^\circ$ 로 바뀌게 된다. 입사각이 더 증가하여 임계각 [ $\sin^{-1}(n_1/n_0) = 41.14^\circ$ ]을 지나게 되면  $\delta$ 가 입사각에 따라 변하게 된다. 임계각보다 큰 입사각 영역에서  $\theta_0=51.01^\circ$  일때 최대값  $\delta_{max}=46.64^\circ$ 를 갖는다. 그리고  $\delta=45^\circ$ 가 되는 입사각은  $47.55^\circ$ 와  $55.46^\circ$ 의 두개가 존재하는데 Fresnel rhomb을 만들때 그림2에서 보듯 입사각 변화에 대해  $\delta$ 의 변화가 상대적으로 적은  $\theta_0=55.46^\circ$ 인 경우를 택하게 된다.

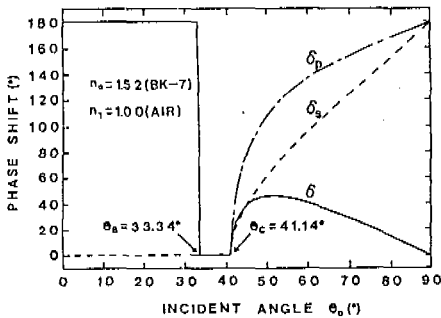


Fig.2. Phase properties of a glass-air interface at 6328 Å.

유리대신 유전체 ( $n_0$ )에서 공기 ( $n_1=1.0$ )로 광파가  $45^\circ$ 로 입사할 경우  $n_0$ 의 변화에 따른  $\delta_{45}$ 의 값을 그림3에 도시하였다.

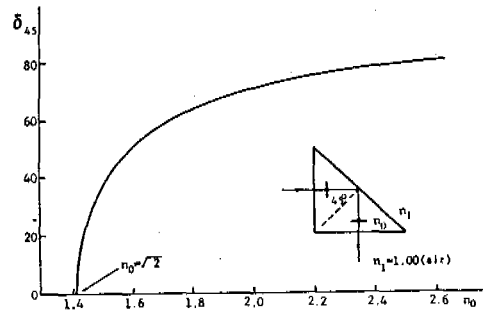


Fig.3. Differential phase shift as functions of  $n_0$  at 6328 Å.

그림에서 보듯이  $n_0$ 가 2보다 작을 때는  $\delta_{45}$ 가  $0^\circ$ 이나  $n_0$ 가 2보다 커질에 따라  $\delta_{45}$ 도 증가함을 알 수 있다. 그림4는 이와같은 계에서  $n_0$ 을 바꾸어 가면서 주어진  $n_0$ 에 있어서 위상변위차의 최대값  $\delta_{max}$ 을 도시한 것으로  $n_0$ 가 증가함에 따라  $\delta_{max}$ 도 증가함을 알 수 있다.

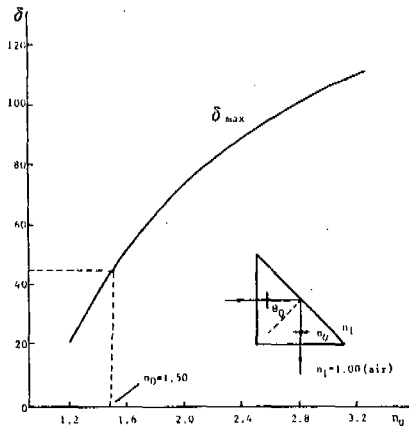


Fig.4. Variation of  $\delta_{max}$  with the change of  $n_0$  at 6328 Å.

다음 장에서는 유리와 공기 사이에 유전체박막이 존재하는 박막계에 의한 위상변위차의 특성을 연구한다.

### IV. 전반사를 이용한 위상변위차 막박계

1. 단일 유전체 박막계에 의한 위상변위차의 보정  
유리 ( $n_0$ )와 공기 ( $n_2=1.0$ ) 사이에 유전체 박막 ( $n_1$ )이 존재하는 박막계를 생각하자, 유리와 공기에 대

한 임계각 보다 큰  $45^\circ$  로 입사할 때  $n_1$ 이 1.2이상 인 경우만 고려하면 유전체 박막과 공기가 이루는 경계면에서 전반사가 일어난다. 이 때 유전체박막의 두께를 변화시키므로서 굴절율에 따라  $\delta$ 가 취할 수 있는 값을 그림5에 도시하였다.  $\delta$ 가 음의 값을 갖게 하는 유전체 박막은  $n_1=1.23$ 인  $\text{CaF}_2$ 가 있다.<sup>27)</sup> 그리고  $n_1$ 이 증가할수록  $\delta$ 가 취할 수 있는  $\delta_{\max}$ 은  $n_1$ 이  $n_0$ 일 때까지는 감소하다가  $n_1$ 이  $n_0$ 보다 클 때는 증가하며,  $\delta_{\min}$ 은  $n_1$ 이  $n_0$ 일때까지는 증가하다가  $n_1$ 이  $n_0$ 보다 클 때는 감소함을 알 수 있다.

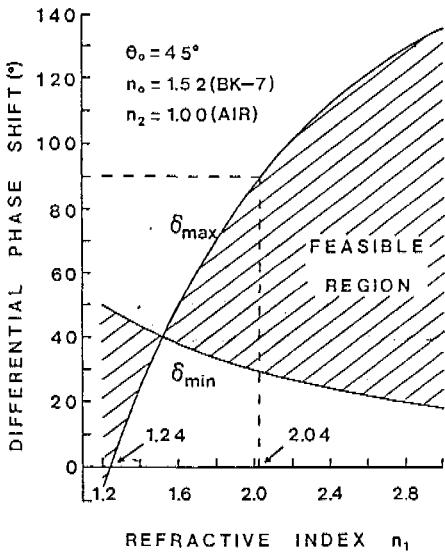


Fig.5. Variation of  $\delta_{\max}$  and  $\delta_{\min}$  for the change of  $n_1$  in the glass-dielectric-air system at 6328 Å.

그림6은 위의 박막계에서  $n_1$ 을 1.23으로 두고 유전체 박막의 광학적 두께변화에 대한  $\delta$ 를 도시한 것이다.  $\delta$ 가  $-0.979^\circ$  에서  $49.21^\circ$  사이의 값을 가짐을 알 수 있다. 그리고  $\delta$ 가 음의 값을 갖는 영역이 광학적 두께  $t$ 가  $0.842 \times \frac{\lambda}{4}$ 에서  $1.027 \times \frac{\lambda}{4}$ 사이의 넓은 영역이 됨을 알 수 있다.  $n=1.24$ 보다 작은 범위에서는  $\delta$ 가 음의 값을 가질 수 있으므로  $\delta=0^\circ$  을 주는 편극상태 유지 박막계를 설계할 수 있다.

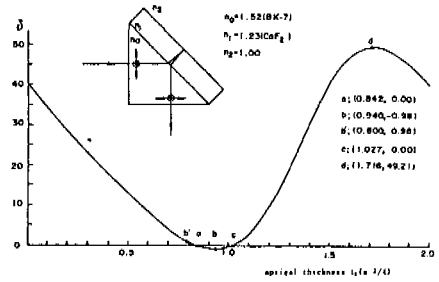


Fig.6. Variation of  $\delta$  with the change of optical thickness of  $\text{CaF}_2$  film at 6328 Å.

그림7은 그림6의 data를 복소 평면에 도식한 것이다. 전반사가 일어나는 경우이므로  $|r_p| = |r_s|$  이 되어  $|\rho| = 1$  이 된다. 따라서 원점과  $\rho$  를 잇는 선분이 실수축과 이루는 각이  $\delta$ 를 나타낸다. 따라서 박막의 광학적 두께  $t$ 가 0일때  $\delta_0 = 40.6^\circ$  에서  $t$ 가 증가함에 따라 최소값  $\delta_{\min} = -0.979^\circ$  까지 변한 후  $t$ 가 계속 증가하면 최대값  $\delta_{\max} = 49.21^\circ$  까지 증가한다. 그리고 계속  $t$ 가 증가하게 되면 광학적 두께  $t$ 가  $\frac{\lambda}{2}$ 일 때  $\delta_0$ 의 값에 돌아오게 되고 계속  $\frac{\lambda}{2}$ 를 수기로 원주상의 점  $\delta_{\max}$ 과  $\delta_{\min}$ 사이를 반복하게 된다.

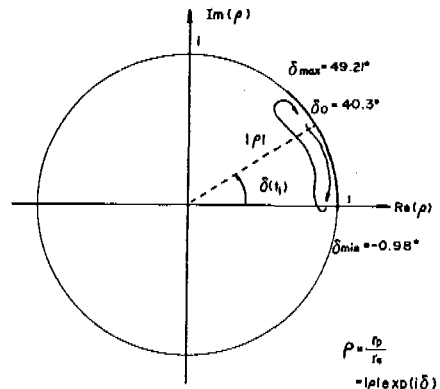


Fig.7. Mapping of differential phase shift into complex plane.

그림8은  $n_1$ 을 2.35( $\text{ZnS}$ )<sup>28)</sup>로 두고 유전체 박막의 광학적 두께를 변화시키면서  $\delta$ 를 계산한 결과이다.  $n_1=2.35$ 인 경우, 그림에서 보듯이,  $\delta$ 가  $24.81^\circ$  에서  $110.03^\circ$  사이의 값을 가짐을 알 수 있다.  $\delta$ 가  $90^\circ$  인 경우는 그림에서 보듯이 두 경우가 있으나

박막의 광학적 두께  $t$ 가  $1,035 \times \frac{\lambda}{4}$ 일때  $\delta$ 가  $90^\circ$  인  
 해가 두께 변화에 대하여 더 안정됨을 알 수 있다.  
 $n_1=2.05$ 인 경우는  $\delta$ 가  $29.13^\circ$  에서  $91.24^\circ$  사이의  
 값을 가짐을 알 수 있다. 이 경우,  $\delta$ 가  $90^\circ$  인 경  
 우는  $0.538 \times \frac{\lambda}{4}$ (a)와  $0.735 \times \frac{\lambda}{4}$ (c)인 두 경우가 있  
 는데 그림에서 보듯이 C인 경우가 두께 변화에 대  
 해  $\delta$ 가 상대적으로 완만히 변함을 알 수 있다. 그  
 리고  $n_1=2.35$ 인 경우 보다도 두께 변화에 따른  $\delta$   
 의 변화가 훨씬 더 안정되어 있음을 알 수 있다.

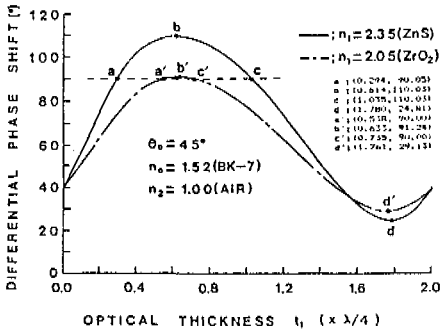


Fig. 8. Variation of  $\delta$  for the change of optical thickness  $t_1$  at 6328 Å.

그림9는 유리를 SF14( $n_0=1.75$ )로 바꾸어, 그  
 림5와 같이 박막의 굴절률을 변화시켜 가면서  $\delta$ 의  
 변화를 도식한 것이다.  $n_1$ 이 1.35이하인 영역에서

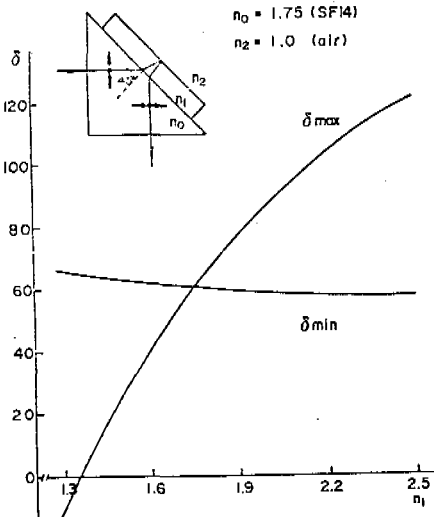


Fig. 9. Variation of  $\delta$  with the change of  $n_1$  at 6328 Å.

유의 값을 취함을 알 수 있다. 그림10는 그림9에서  
 유전체 박막을 MgF<sub>2</sub>( $n_1=1.38$ )를 택했을 때  
 MgF<sub>2</sub>박막의 광학적 두께 변화에 따른  $\delta$ 의 변화를  
 도식한 것으로 광학적 두께  $t$ 가  $1,120 \times \frac{\lambda}{4}$ 일때 양  
 의 최소값  $4.98^\circ$  를 나타내었다.

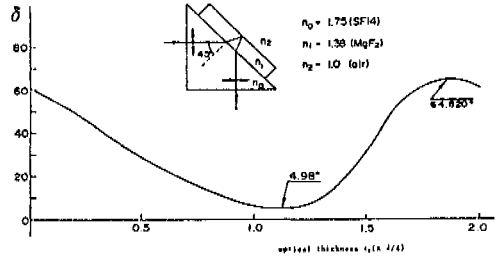


Fig. 10. Variation of  $\delta$  with the change of optical thickness of MgF<sub>2</sub> film at 6328 Å.

그림11은 유리를 LaSF013( $n_0=1.80$ )로 택하고  
 그림5와 같은 방법으로 도식한 것이다.  $n_1=1.$   
 $38$ (MgF<sub>2</sub>)일때 유의 값을 나타냄을 알 수 있다. 그

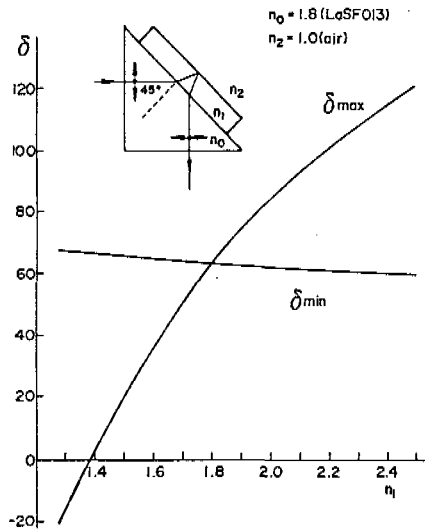


Fig. 11. Variation of  $\delta$  with the change of  $n_1$  at 6328 Å.

림12는 그림11에서 유전체 박막을 MgF<sub>2</sub>로 하여 그  
 림6과 같은 방법으로 도식한 것이다. MgF<sub>2</sub>박막의  
 광학적 두께  $t$ 가  $1,18 \times \frac{\lambda}{4}$ 에서  $1,284 \times \frac{\lambda}{4}$ 인 영역에  
 서 유의 값을 갖고 있음을 알 수 있다. 그림6과 그

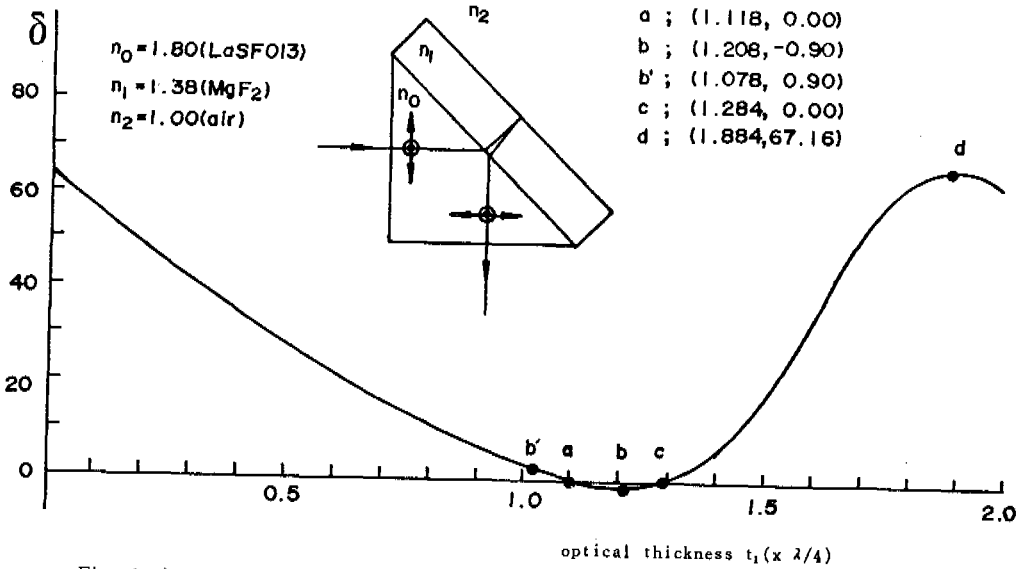


Fig. 12. Variation of  $\delta$  with the change of optical thickness of  $\text{MgF}_2$  film at 6328 A.

림12를 비교해 보면,  $\delta=0$ 인 박막계를 만들 경우, 그림12의 결과를 이용하는 것이 두께 변화에 대해 인정하기 때문에, 그림12의 결과를 이용하는 것이 더 좋을 수 있다. 그림6, 8, 10과 12에 도시된 박막계의  $\delta_{max}$ 와  $\delta_{min}$ 을 표I에 표시하였다.

그림13과 같이 반사계수들의 비가  $\rho_1$ 의 성능을 갖는 박막계에서 반사한 광파는 일반적으로 반사전의 편극상태와는 다르게 되는데,  $\rho_2$ 의 성능을 갖는 전 반사 유전체 박막계를 사용하여 이를 보정할 수 있

다. 그림과 같은 박막계에서 두번 반사후 광파의 편극 상태가 처음 입사될때의 편극 상태와 같게 되려면 즉, 처음 반사에서 생긴  $\delta_1$ 과 두번째 반사에서 생긴  $\delta_2$ 와의 합  $\delta = \delta_1 + \delta_2$ 가 0이 되기 위해서 한쪽 박막계만 생각할 때 위상변위차가 음의 값을 갖는 영역이 있어야 한다. 한편 표I에서 보듯이  $\delta$ 가 음의 값을 갖는 박막계는 그림6과 12에 도시된 박막계들이다. 여기서 우선 그림12에 도시된 박막계를 이용하는 것으로 한다.

그림12에서 보면  $\delta_1 + \delta_2 = \delta$ 을 만들 수 있는 영역은 연속적으로 많은 값들이 존재하나, 각각의 해들 중에서 유전체 박막의 두께 변화에 대한  $\delta$ 의 변화를 고려해서, 박막두께 변화에 대해  $\delta$ 가 가장 작게 변할 때의 박막의 광학적 두께  $t$ 를 가장 적당한 해로 선택하면 된다. 이제 그림12의 data를 이용해서,  $\delta$ 가  $\delta_{min}$ 의 절대치인  $0.90^\circ$ 를 나타내는 b점의  $t$ 인  $1.078 \times \frac{\lambda}{4}$ 보다 조금 작은 값에서  $t$ 를  $10^{-3} (\times \frac{\lambda}{4})$ 씩 증가시키면서 음의 값이 나올때까지  $\delta$ 를 계산한다. 그리고  $t$ 가 그림에서 a점을 지나  $\delta$ 가 처음 음의 값이 나오면 음의  $\delta$ 값과 바로 직전에 계산한 양의  $\delta$ 값으로 부터 선형내삽법에 의해  $\delta=0$ 인  $t_0$ 를

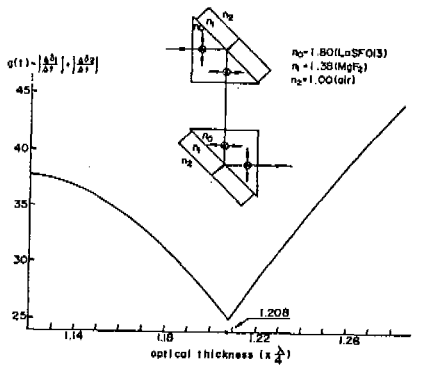


Fig. 13. Variation of  $g(t)$  with the change of optical thickness of dielectric film at 6328 A.

구한다. 이제  $t$ 를  $t_0$ 로부터  $10^{-3}(\times \frac{\lambda}{4})$ 씩 증가시키면서 앞에 계산해둔 양의  $\delta$ 값과 비교하여 합이 0되는  $t$ 를 선형내삽법으로 구한 후 이들 박막계의 두께 변화에 대한 안정성을 계산한다. 즉,

$$g(t) = \left| \frac{\Delta \delta_1(t)}{\Delta t} \right| + \left| \frac{\Delta \delta_2(t)}{\Delta t} \right| \quad (2)$$

를 계산한다. 이 결과를 그림13에 나타내었다. 그림에서 보듯이  $g(t)$ 의 최소값은  $t_1 = 1.208 \times \frac{\lambda}{4}$ 일 때였다. 더욱 정밀한 값을 구하기 위해 최적화 기법을

사용하였는데 그 결과  $t_1 = 1.2076 \times \frac{\lambda}{4}$ ,  $t_2 = 1.0782 \times \frac{\lambda}{4}$  그리고  $\delta_1 = -0.903^\circ$ ,  $\delta_2 = 0.903^\circ$  임을 알았다. 표II는  $n_0 = 1.52$ (BK-7),  $n_1 = 1.23$ (CaF<sub>2</sub>)일 때와  $n_0 = 1.80$ (LaSFO13),  $n_1 = 1.38$ (MgF<sub>2</sub>)일 때의 위상변위차 보정 박막계의 설계결과를 표시한 것이다. 표II는 표I과 비교해 보면 한개의 박막계의  $\delta$ 가  $\delta_{\min}$ 을 갖는 박막두께가 가장 안정된 해임을 알 수 있다. 따라서 유리나 유전체의 굴절율을 잘 선택하여  $\delta_{\min}$ 이 0이 되게하면 더욱 안정된 해를 얻을 수 있겠다.

표 I. 그림 6, 8, 10 그리고 11에 보여진 박막계에서의  $\delta_{\max}$ 과  $\delta_{\min}$ .

그림	$n_0$	$n_1$	$\delta_{\max}$ (deg)	$\delta_{\min}$ (deg)
그림 6	1.52	1.23	49.21	-0.98
그림 8	1.52	2.35	110.03	24.81
그림 8	1.52	2.05	91.24	29.13
그림 10	1.75	1.38	64.82	4.98
그림 12	1.80	1.38	67.16	0.90

표 II. 파장 6328 Å에서 위상변위차를 보정하는 박막계(유리-유전체-공기계)의 최적해

계	$n_0$	$n_1$	$t_1 (\times \lambda/4)$	$t_2 (\times \lambda/4)$	$\delta_1$ (deg)
1	1.80	1.38	1.2076	1.0782	-0.903
2	1.52	1.23	0.9395	0.7985	-0.979

## 2. 위상변위차를 보정하는 이중 유전체 박막계

앞절에서 유리와 공기 사이에 유전체 박막이 1층 있는 박막계에서는, 자주 사용하는 유전체 MgF<sub>2</sub> 박막을 사용할 경우 굴절율이 큰 유리를 사용하거나, 자주 사용하는 BK-7유리( $n_1 = 1.52$ )를 사용할 경우 굴절율이 작은 유전체 박막을 사용하여, 위상변위차 보정박막계를 설계하였다.

이제 유리굴절율 1.52인 경우, 유리와 공기사이에

유전체 박막이 두 층 있는 경우를 생각하자. 이때에는 광파가 유리와 공기에 대한 입체각보다 큰 45°로 입사할 때  $n_1$ 과  $n_2$ 가 1.2이상인 경우만 고려하면 최중경계면에서 전반사가 일어나게 된다. 유리-MgF<sub>2</sub>박막-ZnS박막-공기와 같은 박막계에서 45°로 광파가 입사하여 전반사가 일어날 때  $\delta$ 가 대체로 2.84°에서 133.17° 사이의 값을 취하며, 유리-ZnS박막-MgF<sub>2</sub>박막-공기와 같은 박막계에서는



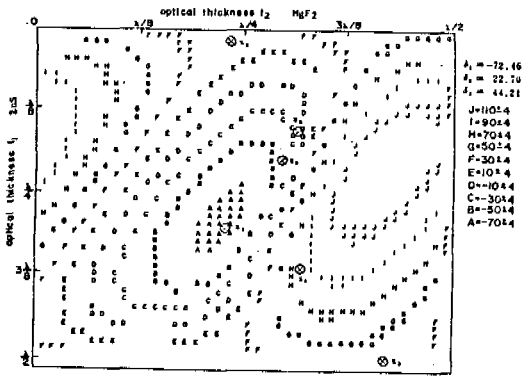


Fig. 14. Variation of  $\delta$  with the change of optical thickness of dielectric film at 6328 Å.

-72.4° 에서 123.7° 사이의 값을 갖는다. 앞에서 계산한 것들은 유전체 박막의 광학적 두께를  $\frac{1}{80} \times \frac{\lambda}{2}$  의 간격으로 변화시키면서 계산한 것이다. 그림14는 유리-ZnS박막-MgF<sub>2</sub>박막-공기 박막계에서 각 유전체의 광학적 두께를  $\frac{1}{40} \times \frac{\lambda}{2}$  간격으로 변화시켜 가면서  $\delta$ 의 값을 구한 다음 20° 의 간격으로  $\delta$ 의 값이 작은값 부터 70° ± 4° 내에 대응되는 점을 A, -50° ± 4° 내에 대응되는 점을 B와 같은 순서로 영문자로 표시한 것이다. 여기서는 자주 사용되는 온 물질 BK-7기판 위에 MgF<sub>2</sub>와 ZnS를 조합하는 방법에 따라  $\delta$ 가 -72.4° 에서 123.7° 까지 변함을 알 수 있다. 특히 음의 값을 갖는 영역이 존재하도록 만들어 보았다. 나아가 일정한 위상변위차를 갖는 박막계를 설계하고자 할때는 유전체 박막을 잘 선택하고 조합하여 안정성을 갖는 일정한 위상변위차를 갖도록 할 수 있다. Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>(n<sub>1</sub>=1.35)와 MgO(n<sub>2</sub>=1.70)<sup>28)</sup>, CeF<sub>3</sub>(n<sub>1</sub>=1.63)과 ZrO<sub>2</sub>(n<sub>2</sub>=2.

04)과 같은 조합에 의한 박막계에서는  $\delta$ 가 90° 를 유지하는 안정된 박막계를 설계할 수 있다.

이제 그림15와 같이 He-Ne laser광장에서, BK-7유리(n<sub>0</sub>=1.52) 그리고 자주 사용하는 ZnS(n<sub>1</sub>=2.35)와 MgF<sub>2</sub>(n<sub>2</sub>=1.38)을 사용하여 유전체 두층으로 만들어진 박막계 2개로 이루어진 위상변위차를 보정시키는 박막계를 생각하자.  $\delta_1$ 과  $\delta_2$ 는 각각 첫 번째와 두번째 박막계에서의 위상변위차, 그리고

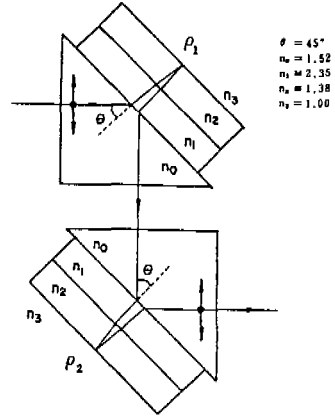


Fig. 15. All dielectric total internal reflection film system correcting differential phase shift.

$t_{11}$ ,  $t_{12}$ 와  $t_{21}$ ,  $t_{22}$ 는 각각 첫번째 박막계와 두번째 박막계에서 ZnS, MgF<sub>2</sub>박막의 광학적 두께로 두고  $(\delta_1 + \delta_2)^2$ 을 박막두께 4개의 변수( $t_{11}$ ,  $t_{12}$ ,  $t_{21}$ ,  $t_{22}$ )에 대해 최소화시킴으로써 박막의 두께를 계산했다. (이 최소화시키는 자세한 기법은 참고 논문 (5)와 (28)을 참조) 계산결과 -72.46° , 22.70° 그리고 44.21° 중 하나를  $\delta_1$  또는  $\delta_2$ 의 값으로 취함을 알았다. 이들 해에 대한 광학적 두께가 표III에 표시되어 있다. 그리고 각 해에 해당하는 좌표가 그림14에 표시되어 있다. 그림에서 보듯이 해의 한쪽 박막계는  $\delta$ 가 극점을 나타내고 있다.

표III. 위상변위차를 보정하는 박막계(유리-ZnS-MgF<sub>2</sub>-공기계)의 최적해

개	$\delta_1$ (deg)	$t_{11} (\times \frac{\lambda}{4})$	$t_{12} (\times \frac{\lambda}{4})$	$t_{21} (\times \frac{\lambda}{4})$	$t_{22} (\times \frac{\lambda}{4})$
1	-72.46	1.1744	0.9106	1.4684	1.2680
2	22.70	0.0266	0.9109	0.6158	1.2680
3	44.21	1.9937	1.6880	0.7816	1.1851

## V. 결 론

박막을 이용하여 전반사에 의한 광파의 편극상태의 변화를 보정 또는 특별한 편극상태로 바꿀 수 있는 박막계를 설계하였다. 금속박막을 사용하지 않고 에너지 손실이 없는 전반사 박막계를 이용하면, 유전체 박막이 1층인 경우는 유리의 굴절율이 비교적 크거나 유전체 박막의 굴절율이 작을 때 즉, 유리 ( $n=1.80$ ) -  $MgF_2$  ( $n=1.38$ ) - 공기계나 유리 ( $n_0=1.52$ ) -  $CaF_2$  ( $n_1=1.23$ ) - 공기계들은 위상변위차를 보정할 수 있다. 그리고 유전체 2층으로 이루어진 전반사 박막계는 비교적 자주 사용하는 물질을 잘 조합함으로써 위상변위차가 갖는 범위를 조절할 수 있으며, 유리 ( $n_0=1.52$ ) -  $ZnS$  -  $MgF_2$  - 공기형 박막계를 통해 비교적 안정된 위상변위차 보정박막계를 설계하였다. 그리고 유리 ( $n_0=1.52$ ) -  $ZnO_2$  ( $n_1=2.05$ ) 공기계에서는 비교적 안정된 90° 위상변위차를 주는 박막계를 설계할 수 있음을 보였다.

\*본 연구는 1988학년도 문교부 학술진흥조성 연구비의 지원을 받았습니다. 연구비를 지원하여준 문교부에 감사사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. M. Born and E. Wolf, Principles of Optics, (Pergamon Press, Oxford, 1975), Chapt. 1.
2. J. M. Bennett and H. E. Benett, Polarization, in Handbook of Optics, W. G. Driscoll and W. Vaughan, Eds, (McGraw-Hill, New York, 1978), Sec. 10.
3. T. R. Ferguson, Opt. Eng. 21, 959(1982).
4. E. Spiller, Appl. Opt. 23, 3529(1984).
5. 한성흥, 박사학위 청구논문, KAIST, 서울 (1988).
6. W. H. Steel, Appl. Opt. 24, 3433(1985).
7. T. R. Ferguson, Appl. Opt. 21, 514(1982).
8. R. A. Chodzko, S. B. Mason, E. B. Turner, and W. W. Plummer, Appl. Opt. 19, 778(1980).
9. W. P. Latham, Appl. Opt. 19, 1222(1980).
10. D. Fink, Appl. Opt. 18, 581(1979).
11. G. C. Dente, Appl. Opt. 18, 2911(1979).
12. S. Kawabata and L. Suzuki, Appl. Opt. 19, 484(1980).
13. W. H. Southwell, Appl. Opt. 18, 1875(1979).
14. V. H. Southwell, Appl. Opt. 19, 2688(1980).
15. R. M. A. Azzam, Opt. Lett. 7, 80(1982).
16. R. M. A. Azzam and M. E. R. Khan, Appl. Opt. 21, 3314(1982).
17. R. M. A. Azzam and M. E. R. Khan, Opt. Comm. 44, 223(1983).
18. A. L. Bloom and D. Fisher, J. Opt. Soc. Am. 70, 626(1980).
19. J. H. Apfel, Appl. Opt. 20, 1024(1981).
20. J. H. Apfel, Appl. Opt. 21, 733(1982).
21. J. K. Guha, J. I. Martin, R. A. Mickish, and E. E. Pape, Appl. Opt. 20, 3089(1981).
22. J. H. Apfel, Appl. Opt. 23, 1178(1984).
23. E. Spiller, Appl. Opt. 23, 3544(1984).
24. P. B. Mauer, J. Opt. Soc. Am. 58, 1160(1968).
25. P. Mauer, J. Opt. Soc. Am. 56, 1219(1966).
26. OHARA OPTICAL GLASS Catalogue.
27. H. K. Pulker, Appl. Opt. 18, 1969(1979).
28. H. A. Macleod, Thin Film Optical Filters, American Elsevier, New York(1969).