

0.633 μ m 영역에서 설계된 위상변위차 박막계의 두께 오차에 대한 성능 분석

한 성 홍 · 고 승 국
물 리 학 과
(1983. 4. 27접수)

〈요 약〉

선형 편극된 광파가 45°로 입사할 때 원형 편극으로 반사시키는 위상변위차 다층박막계를 중심파장이 0.633 μ m인 영역($\frac{d\lambda}{\lambda_0} \approx 0.1$)에서 설계하였다. 설계된 박막계는 이 영역에서 각 편극에 대한 반사율은 99.95%이상이었으며 위상변위차는 90° ± 0.15°이내에서 실험합을 알았다. 그리고 이 박막계에 두께 오차가 포함된 경우에 대하여 spectral performance를 계산하였다. 이 결과로 우리는 이 위상 변위차를 실제로 제작할 때는 가운데에 위치하는 박막층에 대하여 더 정밀히 thickness monitoring을 하여야 함은 알았다.

Effect of the Thickness Error in the Differential Phase Shift Multilayer System Designed in the Region of 0.633 μ m

Sung Hong Hahn · Seung Kook Ko
Dept. of Physics
(Received April 27, 1983)

〈Abstract〉

We designed 20 layer thin film system which gives 90° differential phase shift between p-polarization and s-polarization in the region of 0.633 μ m ($\frac{d\lambda}{\lambda_0} \approx 0.1$). In this thin film system the reflectances of two polarizations are greater than 99.95% and the differential phase shift is within 90° ± 0.15°. And we have calculated the spectral performance of this system whose thicknesses are involved errors. From these results it is found that we have to monitor more precisely the thicknesses located between 4th and 10th layer in producing this thin film system.

I. 서 론

다층 박막 이론은 무반사 필름(antireflection film), 고반사 필름(high reflection film), 대역 통과 필터(band pass filter), edge filter, polarizing beam splitter 등 많은 광학필터를 설계하는데 이용되고 있다.^(1~4) 최근에 보다 정밀한 계측기가 요구됨에 따라 레이저광과의 편극 상태에 대한 연구가 활발하다.⁽⁵⁾

경계면에서 임의의 각도로 광파가 입사하는 경우 반사 광파는 일반적으로 타원 편광되지만,⁽⁶⁾ 다층 박막을 이용하면 편극 상태를 조절할 수 있다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 편극상태를 조절할 수 있는 다층 박막계중에서 그림 1과 같이 선형 편극된 0.633 μ m 영역($\frac{d\lambda}{\lambda_0} \approx 0.1$)의 광파가 입사할 때 에너지 손실 없이 원형 편광으로 반사시키는 박막계를 컴퓨터를 사용하여 설계하였다. 그리고 최적 설계된 이 박막계의 최적 두께에 오차가 포함되었을 때 편극 상태의 spectral performance를 구하였다.

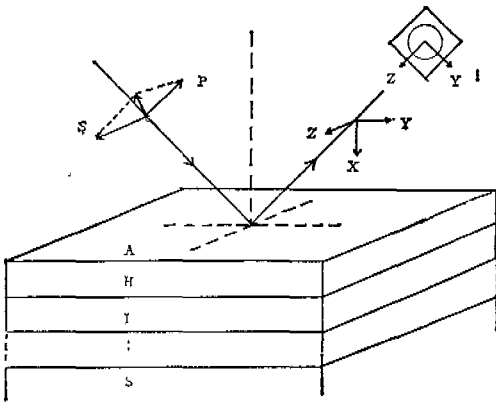


Fig. 1. System of multilayer thin film

다층 박막의 매질로서는 ZnS(H)와 MgF₂(L) 유전체 박막을 사용하였으며, 반사율을 높이기 위하여 Ag의 두꺼운 박막을 기판으로 사용하였다.

II. 이 론

그림 2와 같이 공기층과 기판 사이에 *m*층의 유전체 다층 박막이 있고 이 박막들이 *y-z*평면에 무한히 평행하다고 할 때, 이 박막계에 optical region의 광파가 입사하는 경우를 생각하자. *j* (*j* = 0, 1, ..., *m*)번째 경계면에서의 전장과 자장의 크기를 *E_j*, *H_j*로 표시하면 다음과 같은 관계식이 성립한다. (1,3)

$$\begin{pmatrix} E_0 \\ H_0 \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^m A_j \begin{pmatrix} E_m \\ H_m \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$A_j = \begin{pmatrix} \cos \phi_j & iY_j^{-1} \sin \phi_j \\ iY_j \sin \phi_j & \cos \phi_j \end{pmatrix}, i = \sqrt{-1}$$

여기서 ϕ_j 는 광파가 *j*번째 박막층을 통과하는 동안 기하학적 두께 *h_j*에 의한 위상변화로서 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_j = \frac{2\pi}{\lambda} T_j$$

λ 는 입사 광파의 파장이며, *T_j*는 *j*번째 박막층의 광학적 두께(optical thickness)로서

$$T_j = n_j h_j \cos \theta_j$$

이다. *n_j*는 *j*번째 층의 굴절율, θ_j 는 *j*번째 층에서의 광파의 입사각이다. 그리고 *Y_j*는 *j*번째 층의 admittance로서 *s*평면에 대하여는 *n_jcosθ_j*, *p*평면에 대하여는 *n_j/cosθ_j*로 주어진다. (2) 식에서 *A_j*는 characteristic matrix로서 unitary matrix

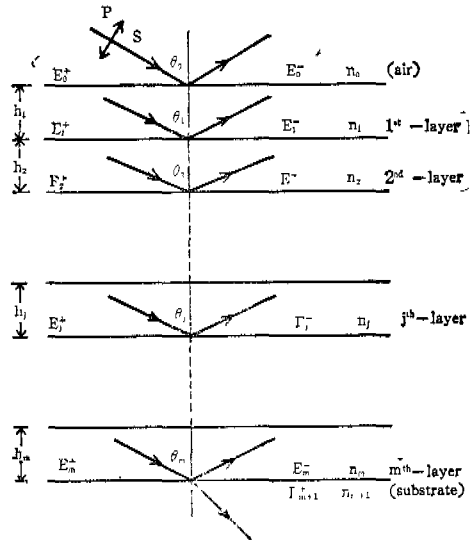


Fig. 2. Fields in the multilayer thin film.

이다. 비흡수 박막의 경우 *Y_j*, ϕ_j 가 모두 실수가 되므로, 이 행렬들을 끝단 행렬의 대각 성분(diagonal element)들은 항상 실수이고 그의 성분들은 허수이다. 그리고 *A_j*는 *j*번째 박막층의 특성임으로 기술되어 있기 때문에 수치계산에 이 행렬을 이용하는 것이 편리하다.

*j*번째 층의 하면에 입사하는 광파의 반사하는 광파의 전장의 세기를 각각 *E_j⁺*와 *E_j⁻*라 하고 (*m*+1)번째 층 즉 기판의 상단부에서의 전장의 크기를 *E_{m+1}⁺*이라고 하면 다음 관계식이 성립한다.

$$\begin{aligned} E_0 &= E_0^+ + E_0^- \\ H_0 &= Y_0(E_0^+ - E_0^-) \\ E_m &= E_{m+1}^+ \\ H_m &= Y_{m+1}E_{m+1}^+ \end{aligned} \quad (5)$$

따라서 (1)과 (5)식으로 부터 다음 식을 얻는다.

$$\begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2Y_0} \\ \frac{1}{2} & \frac{-1}{2Y_0} \end{pmatrix} \prod_{j=1}^m \begin{pmatrix} 1 \\ Y_{m+1} \end{pmatrix} E_{m+1}^+ \quad (6)$$

(6)식으로 부터 광파의 각 편극에 대한 Fresnel coefficient(γ)을 구할 수 있고, 이 Fresnel coefficient로 부터 반사율(*R*)과 위상변위차(δ)를 구할 수 있다. 즉,

$$\gamma_s = \left(\frac{E_0^-}{E_0^+} \right), \quad (7)$$

$$\gamma_p = \left(\frac{E_0^-}{E_0^+} \right), \quad (8)$$

$$R_p = |\gamma_p|^2 \quad (9)$$

$$R_s = |\gamma_s|^2 \quad (10)$$

$$\delta = \arg\left(-\frac{\gamma_p}{\gamma_s}\right) \quad (11)$$

여기서 밑줄자 p, s 는 광파의 편극 상태를 표시한다.

III. 설계 조건

선형 편극된 광파가 다층 박막에 입사하여 에너지 손실없이 인칭편극으로 반사되기 위해서는 각 편극에 대하여 반사율이 1이 되어야 하며 반사후 두 편극 사이의 위상변위차가 90°가 되어야 한다. 즉 (9)~(11)식들은

$$R_p = 1 \quad (12)$$

$$R_s = 1 \quad (13)$$

$$\delta = 90^\circ \quad (14)$$

가 되어야 한다. (14)식에서 우변은 $\pm 90^\circ$ 모두 가능하지만 $+90^\circ$ 인 경우만 생각하자. 그리고 입사각은 45° 로 택하고 반사율을 높이기 위하여, 박막층의 번호가 높은 경우에 굴절율이 큰 ZnS 박막, 싸수인 경우에 MgF_2 박막이 되도록 하였다. 박막층 수를 너무 크게 두는 것은 실제 제작상 어려운 문제가 따르기 때문에 20층으로 제한하였다.

중심파장(λ_0)은 $0.633\mu\text{m}$ 을 택하였는데, 이 중심파장 한 파장에 대하여 (12), (13), (14)식들을 만족시켜 주는 박막계의 해는 일반적으로 중심파장 영역($\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx 0.1$)에서 위의 조건은 만족시켜 주지 않

는다.⁽⁷⁾ 따라서 중심파장 영역에서 여러 파장을 택하여 계산하여야 하므로 이들의 계산량은 상당히 많아지게 된다.

IV. 최적 설계된 90° 위상변위차 반사막계

해석적으로 (12)~(14)식들을 만족시키는 해를 구할 수 없기 때문에 최적설계 방법 중에서 gradient method를 사용하여 구하였다. objective function f 는 다음과 같이 두었다.

$$f = \sum_{N=1}^L [(R_{p,N} - 1)^2 + (R_{s,N} - 1)^2 + W_N(\delta_N - 90^\circ)^2] \quad (15)$$

여기서 $R_{p,N}$, $R_{s,N}$ 및 δ_N 는 N 번째 파장에서의 s 파의 반사율, p 파의 반사율 및 위상변위차를 표시한다. 그리고 W_N 은 N 번째 파장에서의 상대적인 가중치이며, L 는 선택된 파장의 수이다. 입사각과 박막매질이 미리 주어졌으므로 각 주어질 파장에 대하여 $R_{p,N}$, $R_{s,N}$ 및 δ_N 는 광학적 두께 $T_j (j = 1, 2, \dots, 20)$ 의 함수가 된다.

최적화된 각 박막층의 두께가 표 1에 표시되어 있다. 표에서 표시된 두께는 각 박막층의 광학적 두께를 기준파장의 $\frac{1}{4}$ 에 대한 배수로 표시하였다.

표 1의 최적두께에 의하여 구성된 다층박막계의 spectral performance를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 기준파장의 10% 영역 내에서 위상변위차가 $90^\circ \pm 0.15^\circ$ 이내에서 진동하고 있음을 알 수 있다. 또한 각 파에 대한 반사율이 99.95% 이상인

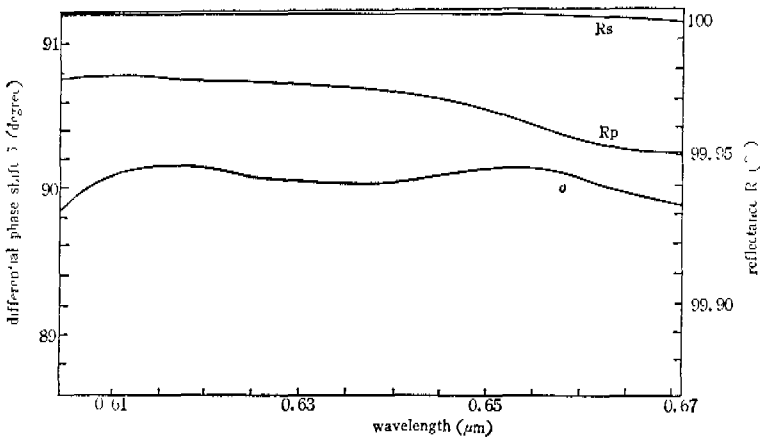


Fig. 3. Spectral performance of the twenty layer 90° differential phase shift reflector for 0.633 μm .

을 알 수 있다.

Table 1. Optimal layer thicknesses in fractions of quarterwave for 90° differential phase shift reflector.

layer number	layer thickness
1(H)	0.160
2(L)	0.906
3	0.797
4	0.643
5	0.672
6	0.633
7	0.767
9	0.857
9	0.891
10	0.889
11	0.901
12	0.891
13	0.948
14	0.934
15	0.964
16	0.966
17	0.984
18	0.994
19	1.000
20	0.949

V. 두께 오차에 의한 spectral performance의 변화

다층 박막을 진공 증착 따위의 방법을 이용하여 실제로 제작할 때 thickness monitoring 과정에서 오차가 생기게 된다. 따라서 표 1의 최적 두께에 uniform random error가 포함된 경우에 대한 spectral performance를 그림 4~6에 도시하였다 IBM subroutine package RANDU를 사용하여 seed number(그림에서는 seed로 표시되어 있다)를 100007, 300007, 600007, 900007로 주고 각각 20개의 random number를 만들어서 계산하였다.

그림 4는 0.5% 이내의 uniform random error가 포함된 경우인데 중심파장의 10%이내의 영역에서 위상변위차가 대체로 90°와 91° 이내에서 진동하고 있음을 보여준다. 그림 5와 6은 각각 1%와 2%이내의 uniform random error가 포함된 경우로서 90°와 92°사이의 90°와 94°사이에서 진동하고 있음을 보여준다.

그리고 $j(j=1, 2, \dots, 20)$ 번째 박막층의 두께만이 최적두께의 $\pm 0.5\%$, $\pm 1\%$ 및 $\pm 2\%$ 의 오차가 포함된 박막층의 위상변위차의 파장에 대한 spectral performance를 표 2와 3, 표 4와 5 및 표 6과 7에

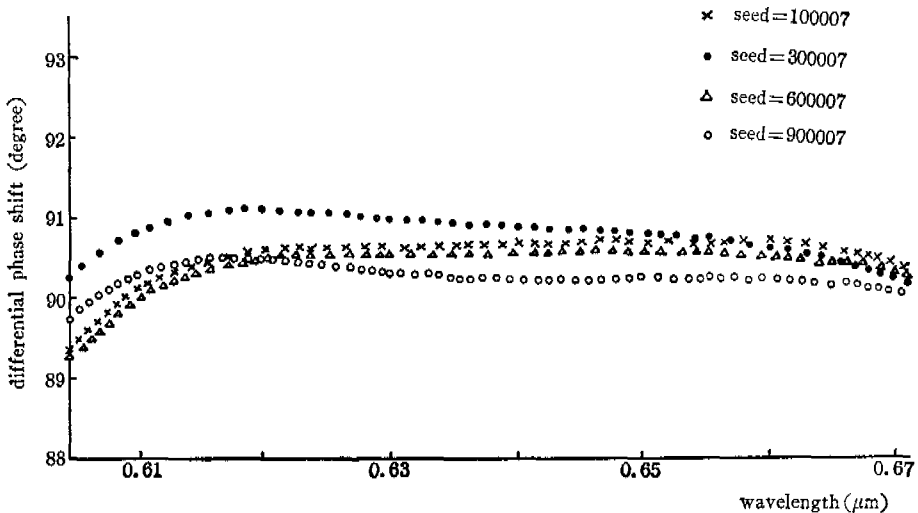


Fig. 4. Spectral performance of 90° differential phase shift reflector whose thicknesses are to deviate 0.5% in a uniform random fashion from their optimal design.

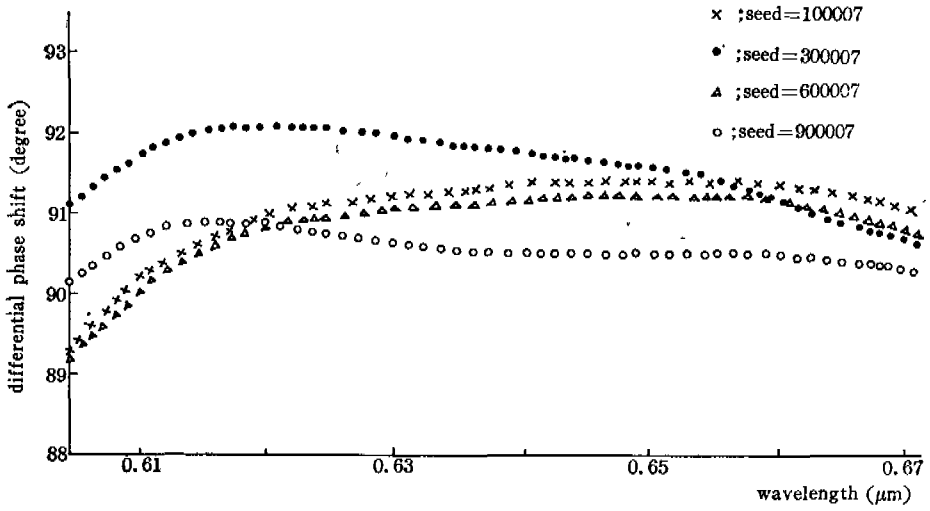


Fig. 5. Spectral performance of 90° differential phase shift reflector whose thicknesses are to deviate 1% in a uniform random fashion from their optimal design.

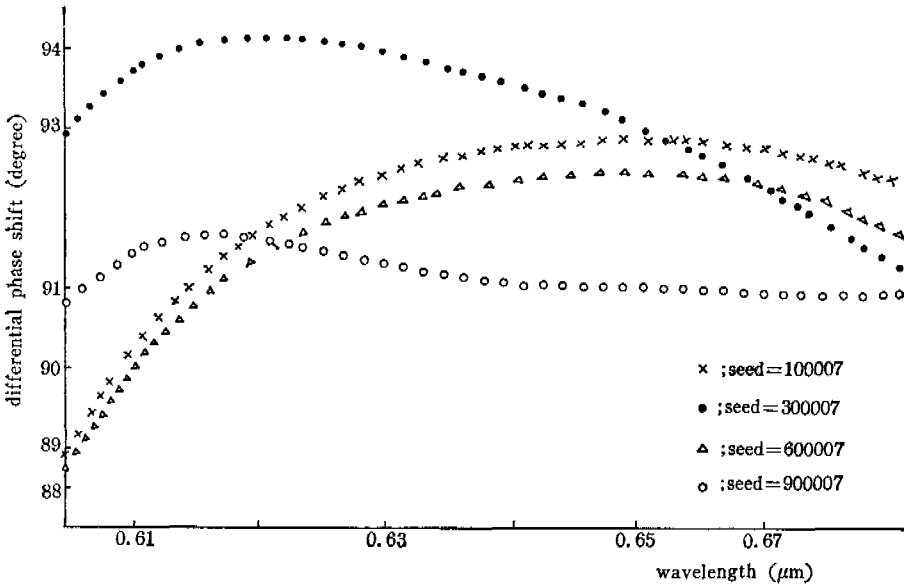


Fig. 6. Spectral performance of 90° differential phase shift reflector whose thicknesses are to deviate 2% in a uniform random fashion from their optimal design.

나타내었다. 이 경우도 그림 4~6에서와 마찬가지로 두께 오차가 클수록 위상변위차가 최적치로부터 큰 변위를 갖게 됨은 보여준다. 특히 박막층 수가 4~10에 속하는 박막층에 두께 오차가 포함되었을 때 최적치로부터 큰 변위를 갖는 것을 알 수 있다. 표 8과 9, 표 10과 11들은 각각 j 번째 박막층만

의 광학적 최적두께에 $\pm 0.005 \times \frac{\lambda_0}{4}$, $\pm 0.01 \times \frac{\lambda_0}{4}$ 의 광학적 두께가 일정하게 포함된 박막계의 위상변위차의 파장에 대한 spectral performance를 표시한 것이다. 이들 경우도 표 2~7과 마찬가지로 두께 오차가 클수록 최적치로부터 큰 변위를 갖게 됨은 보여줄 뿐만 아니라 박막층 수가 4~10에 속하

Table 2. Spectral performance of 90° differential phase shift reflector whose thickness to deviate 0.5% from the optimal design.

thick- ness # with error	wavelength (N): $(1+0.94N) \times 0.633 \mu\text{m}$										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	89.60	90.09	90.15	90.03	89.89	89.82	89.83	89.87	89.91	89.92	89.86
2	90.29	90.60	90.46	90.14	89.83	89.62	89.52	89.51	89.53	89.55	89.54
3	90.83	91.16	90.97	90.58	90.18	89.87	89.69	89.60	89.55	89.52	89.46
4	91.21	91.65	91.53	91.15	90.75	90.41	90.19	90.05	89.95	89.86	89.75
5	91.29	91.89	91.91	91.63	91.29	91.00	90.80	90.68	90.59	90.49	90.37
6	91.09	91.82	91.96	91.80	91.55	91.34	91.21	91.14	91.10	91.05	90.97
7	90.69	91.51	91.74	91.67	91.51	91.37	91.31	91.30	91.33	91.34	91.32
8	90.25	91.11	91.40	91.39	91.27	91.19	91.17	91.21	91.28	91.34	91.36
9	89.88	90.75	91.06	91.08	90.99	90.93	90.94	91.00	91.09	91.17	91.21
10	89.60	90.47	90.79	90.81	90.74	90.69	90.70	90.77	90.86	90.94	90.98
11	89.39	90.26	90.58	90.60	90.53	90.48	90.49	90.56	90.65	90.72	90.74
12	89.24	90.11	90.43	90.45	90.38	90.32	90.33	90.39	90.47	90.53	90.54
13	89.14	90.00	90.31	90.33	90.26	90.20	90.21	90.26	90.33	90.37	90.36
14	89.07	89.93	90.24	90.26	90.18	90.12	90.12	90.17	90.23	90.26	90.23
15	89.02	89.87	90.19	90.20	90.12	90.06	90.06	90.10	90.16	90.18	90.14
16	88.98	89.84	90.15	90.17	90.08	90.02	90.02	90.06	90.11	90.12	90.08
17	88.96	89.81	90.12	90.14	90.06	90.00	89.99	90.03	90.07	90.08	90.03
18	88.94	89.80	90.11	90.12	90.04	89.98	89.97	90.01	90.05	90.06	90.00
19	88.93	89.78	90.09	90.11	90.03	89.96	89.96	89.99	90.03	90.04	89.98
20	88.92	89.77	90.09	90.10	90.02	89.96	89.95	89.98	90.02	90.03	89.97

Table 3. Spectral performance of 90° differential phase shift reflector whose thickness to deviate -0.5% from the optimal design.

thick- ness # with error	wavelength (N): $(1+0.94N) \times 0.633 \mu\text{m}$										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	89.22	89.87	90.09	90.10	90.07	90.70	90.10	90.14	90.15	90.09	89.86
2	88.55	89.37	89.79	90.00	90.15	90.28	90.40	90.50	90.53	90.46	90.27
3	88.04	88.86	89.32	89.60	89.82	90.04	90.25	90.42	90.51	90.49	90.34
4	87.68	88.41	88.81	89.07	89.29	89.53	89.77	89.98	90.12	90.14	90.05
5	87.57	88.16	88.45	88.63	88.79	88.98	89.19	89.38	89.50	89.52	89.43
6	87.71	88.19	88.38	88.46	88.54	88.66	88.80	88.93	89.00	88.97	88.84
7	88.04	88.44	88.55	88.55	88.56	88.61	88.69	88.75	88.76	88.67	88.47
8	88.43	88.79	88.84	88.79	88.75	88.76	88.79	88.81	88.78	88.64	88.40
9	88.78	89.12	89.15	89.07	89.01	88.99	89.00	89.00	88.94	88.79	88.53
10	89.06	89.39	89.40	89.32	89.24	89.22	89.22	89.21	89.15	89.00	88.75
11	89.27	89.59	89.61	89.52	89.44	89.41	89.42	89.42	89.36	89.22	88.98
12	89.41	89.74	89.76	89.67	89.59	89.57	89.58	89.58	89.54	89.41	89.20
13	89.52	89.85	89.87	89.78	89.71	89.69	89.71	89.72	89.69	89.58	89.38
14	89.60	89.93	89.95	89.86	89.79	89.77	89.80	89.82	89.80	89.70	89.52
15	89.65	89.98	90.00	89.92	89.85	89.84	89.86	89.89	89.88	89.79	89.63
16	89.69	90.02	90.04	89.96	89.89	89.88	89.91	89.94	89.93	89.85	89.71
17	89.71	90.04	90.06	89.98	89.92	89.91	89.94	89.97	89.97	89.90	89.76
18	89.73	90.06	90.08	90.00	89.93	89.93	89.96	90.00	90.00	89.93	89.79
19	89.74	90.07	90.09	90.01	89.95	89.94	89.97	90.01	90.01	89.95	89.82
20	89.75	90.08	90.10	90.02	89.96	89.95	89.98	90.02	90.03	89.96	89.83

Table 4. Spectral performance of 90° differential phase shift reflector whose thickness to deviate 1% from the optimal design.

thickn- ess # with error	wavelength (N);(1+0.94N) \times 0.633 μm										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	89.79	90.20	90.18	89.99	89.80	89.70	89.69	89.74	89.80	89.83	89.81
2	91.20	91.25	90.82	90.22	89.68	89.30	89.09	89.02	89.04	89.10	89.17
3	92.31	92.40	91.88	91.13	90.40	89.82	89.43	89.20	89.08	89.03	89.01
4	93.07	93.41	93.04	92.34	91.59	90.94	90.45	90.12	89.88	89.72	89.58
5	93.19	93.88	93.82	93.34	92.73	92.17	91.72	91.40	91.17	90.99	90.83
6	92.72	93.69	93.90	93.66	93.26	92.86	92.55	92.34	92.20	92.11	92.03
7	91.84	92.99	93.40	93.36	93.14	92.90	92.73	92.66	92.65	92.68	92.72
8	90.93	92.15	92.67	92.74	92.63	92.49	92.43	92.45	92.54	92.65	92.78
9	90.16	91.41	91.96	92.09	92.03	91.95	91.94	92.01	92.13	92.29	92.45
10	89.59	90.83	91.39	91.54	91.50	91.44	91.45	91.53	91.66	91.82	91.98
11	89.18	90.41	90.97	91.11	91.08	91.02	91.02	91.10	91.22	91.37	91.50
12	88.90	90.11	90.66	90.80	90.77	90.71	90.70	90.77	90.87	90.99	91.09
13	88.69	89.89	90.44	90.58	90.53	90.47	90.45	90.50	90.59	90.69	90.75
14	88.55	89.75	90.29	90.42	90.38	90.30	90.28	90.32	90.40	90.47	90.51
15	88.45	89.65	90.18	90.32	90.27	90.19	90.16	90.19	90.26	90.31	90.33
16	88.39	89.58	90.11	90.24	90.19	90.11	90.08	90.11	90.16	90.21	90.21
17	88.34	89.53	90.06	90.19	90.14	90.06	90.03	90.05	90.10	90.13	90.12
18	88.30	89.49	90.03	90.16	90.10	90.02	89.99	90.01	90.05	90.09	90.07
19	88.28	89.47	90.01	90.13	90.08	90.00	89.96	89.98	90.02	90.05	90.03
20	88.26	89.45	89.99	90.12	90.06	89.98	89.94	89.96	90.00	90.03	90.01

Table 5. Spectral performance of 90° differential phase shift reflector whose thickness to deviate -1% from the optimal design.

thickn- ess # with error	wavelength (N);(1+0.94N) \times 0.633 μm										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	89.03	89.76	90.06	90.14	90.16	90.19	90.23	90.27	90.27	90.18	90.01
2	87.72	88.79	89.48	89.96	90.32	90.61	90.85	91.00	91.03	90.91	90.62
3	86.73	87.80	88.58	89.18	89.70	90.16	90.55	90.84	90.99	90.97	90.77
4	86.03	86.93	87.60	88.16	88.67	89.17	89.61	89.97	90.21	90.28	90.18
5	85.79	86.45	86.92	87.31	87.70	88.10	88.48	88.79	88.98	89.04	88.93
6	86.02	86.48	86.75	86.97	87.21	87.47	87.72	87.91	87.99	87.94	87.75
7	86.63	86.93	87.05	87.12	87.22	87.35	87.47	87.53	87.49	87.32	87.00
8	87.37	87.58	87.60	87.58	87.58	87.62	87.65	87.63	87.50	87.24	86.48
9	88.04	88.21	88.17	88.10	88.06	88.05	88.04	87.97	87.80	87.50	87.07
10	88.58	88.73	88.67	88.58	88.52	88.49	88.46	88.39	88.21	87.91	87.49
11	88.99	89.13	89.07	88.97	88.91	88.88	88.86	88.79	88.63	88.35	87.96
12	89.28	89.43	89.37	89.27	89.21	89.19	89.18	89.12	88.99	88.74	88.40
13	89.50	89.65	89.59	89.50	89.44	89.43	89.43	89.40	89.29	89.08	88.78
14	89.65	89.80	89.75	89.66	89.61	89.60	89.62	89.60	89.51	89.33	89.08
15	89.76	89.91	89.86	89.77	89.73	89.73	89.75	89.75	89.68	89.53	89.31
16	89.83	89.99	89.94	89.85	89.81	89.81	89.85	89.85	89.80	89.66	89.47
17	89.88	90.04	89.99	89.90	89.86	89.87	89.91	89.93	89.88	89.76	89.59
18	89.92	90.07	90.02	89.94	89.90	89.92	89.96	89.98	89.94	89.83	89.67
19	89.95	90.10	90.05	89.97	89.93	89.94	89.99	90.01	89.98	89.87	89.72
20	89.96	90.12	90.07	89.98	89.94	89.96	90.01	90.03	90.00	89.90	89.76

Table 6. Spectral performance of 90° differential phase shift reflector whose thickness to deviate 2% from the optimal design.

thick- ness # with error	wavelength (N);(1+0.94N)×0.633 μm										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	90.18	90.42	90.24	89.91	89.63	89.46	89.42	89.47	89.56	89.65	89.70
2	93.08	92.62	91.59	90.43	89.42	88.68	88.24	88.05	88.05	88.19	88.42
3	95.43	95.07	93.89	92.40	90.96	89.80	88.96	88.43	88.14	88.04	88.08
4	96.94	97.21	96.40	95.03	93.53	92.19	91.11	90.33	89.78	89.42	89.22
5	96.94	98.06	97.99	97.16	96.00	94.84	93.83	93.04	92.45	92.03	91.73
6	95.66	97.39	97.98	97.75	97.08	96.28	95.57	95.00	94.60	94.33	94.17
7	93.63	95.68	96.70	96.92	96.68	96.27	95.88	95.61	95.47	95.45	95.53
8	91.65	93.79	94.99	95.46	95.47	95.30	95.14	95.07	95.13	95.29	95.55
9	90.08	92.21	93.46	94.01	94.14	94.09	94.03	94.07	94.21	94.46	94.80
10	88.95	91.03	92.28	92.85	93.01	93.00	92.98	93.04	93.21	93.46	93.79
11	88.16	90.19	91.40	91.97	92.13	92.12	92.10	92.16	92.31	92.53	92.81
12	87.62	89.61	90.80	91.35	91.50	91.48	91.45	91.49	91.61	91.79	92.01
13	87.23	89.20	90.37	90.90	91.03	91.00	90.96	90.98	91.06	91.21	91.37
14	86.97	88.92	90.07	90.60	90.72	90.68	90.63	90.62	90.69	90.80	90.92
15	86.79	88.73	89.87	90.39	90.51	90.46	90.39	90.38	90.43	90.51	90.60
16	86.67	88.60	89.73	90.25	90.36	90.31	90.24	90.22	90.25	90.32	90.38
17	86.58	88.50	89.64	90.15	90.26	90.21	90.13	90.10	90.13	90.19	90.24
18	86.51	88.44	89.57	90.08	90.20	90.14	90.06	90.03	90.05	90.10	90.14
19	86.46	88.39	89.52	90.03	90.15	90.09	90.01	89.98	90.00	90.04	90.07
20	86.43	88.35	89.49	90.00	90.12	90.06	98.98	89.94	89.96	90.00	90.03

Table 7. Spectral performance of 96° differential phase shift reflector thickness to deviate -2% from the optimal design.

thick- ness # with error	wavelength (N);(1+0.94N)×0.633 μm										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	88.66	89.55	90.00	90.22	90.34	90.43	90.50	90.54	90.50	90.36	90.11
2	86.11	87.68	88.91	89.90	90.69	91.31	91.76	92.01	92.03	91.80	91.31
3	84.28	85.87	87.25	88.46	89.53	90.45	91.19	91.70	91.96	91.92	91.58
4	82.97	84.28	85.47	86.58	87.63	88.58	89.39	90.01	90.40	90.62	90.38
5	82.47	83.37	84.21	85.03	85.82	86.57	87.21	87.70	89.98	88.04	87.88
6	82.79	83.34	83.84	84.35	84.86	85.33	85.72	85.96	86.01	85.84	85.48
7	83.80	84.07	84.31	84.55	84.81	85.03	85.16	85.14	84.94	84.53	83.94
8	85.10	85.20	85.25	85.32	85.40	85.45	85.41	85.22	84.85	84.27	83.51
9	86.34	86.34	86.29	86.26	86.25	86.20	86.07	85.80	85.35	84.69	83.87
10	87.36	87.32	87.22	87.15	87.09	87.02	86.86	86.57	86.10	85.45	84.65
11	88.15	88.10	87.99	87.90	87.84	87.77	87.62	87.35	86.91	86.31	85.59
12	88.73	88.68	88.57	88.49	88.44	88.38	88.26	88.02	87.65	87.12	86.51
13	89.18	89.12	89.02	88.94	88.91	88.87	88.79	88.60	88.28	87.85	87.35
14	89.48	89.43	89.33	89.27	89.25	89.23	89.18	89.03	88.78	88.41	88.02
15	89.70	89.65	89.56	89.50	89.49	89.50	89.47	89.36	89.15	88.85	88.56
16	89.85	89.80	89.71	89.66	89.67	89.69	89.68	89.59	89.42	89.18	88.95
17	89.96	89.91	89.82	89.78	89.79	89.81	89.82	89.76	89.61	89.41	89.23
18	90.03	89.98	89.90	89.86	89.87	89.90	89.92	89.87	89.74	89.57	89.43
19	90.08	90.03	89.95	89.91	89.92	89.97	89.99	89.95	89.83	89.68	89.57
20	90.12	90.07	89.98	89.94	89.96	90.01	90.03	90.00	89.89	89.75	89.66

Table 8. Spectral performance of 90° differential phase shift reflector whose thickness to deviate $\lambda_0/4 \times 0.005$ from the optimal design.

thickn- ess # with error	wavelength (N):(1+0.94N)×0.633 μm										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	90.61	90.67	90.31	89.83	89.43	89.19	89.12	89.18	89.30	89.44	89.58
2	91.41	91.27	90.67	89.97	89.37	88.97	88.79	88.78	88.88	89.04	89.23
3	92.13	92.00	91.35	90.54	89.82	89.30	89.00	88.89	88.90	88.99	89.12
4	92.75	92.81	92.26	91.48	90.73	90.15	89.78	89.58	89.51	89.51	89.55
5	92.89	93.21	92.87	92.23	91.58	91.05	90.71	90.52	90.45	90.44	90.46
6	92.58	93.11	92.98	92.52	92.01	91.60	91.34	91.24	91.24	91.30	91.38
7	92.05	92.70	92.69	92.35	91.95	91.64	91.47	91.45	91.52	91.66	91.82
8	91.54	92.24	92.29	92.02	91.68	91.42	91.31	91.33	91.46	91.64	91.85
9	91.12	91.83	91.91	91.67	91.36	91.13	91.05	91.09	91.24	91.44	91.67
10	90.80	91.51	91.60	91.37	91.07	90.85	90.78	90.83	90.98	91.18	91.40
11	90.57	91.28	91.37	91.14	90.84	90.62	90.54	90.60	90.74	90.93	91.13
12	90.40	91.11	91.20	90.97	90.67	90.45	90.36	90.41	90.54	90.71	90.90
13	90.29	91.00	91.08	90.85	90.55	90.32	90.23	90.27	90.39	90.55	90.71
14	90.22	90.92	91.00	90.76	90.46	90.23	90.14	90.17	90.28	90.43	90.58
15	90.16	90.86	90.94	90.71	90.40	90.17	90.07	90.10	90.20	90.34	90.48
16	90.13	90.83	90.91	90.67	90.36	90.13	90.03	90.05	90.15	90.28	90.41
17	90.10	90.80	90.88	90.64	90.34	90.10	90.00	90.02	90.12	90.24	90.37
18	90.09	90.78	90.86	90.63	90.32	90.09	89.98	90.00	90.09	90.22	90.33
19	90.07	90.77	90.85	90.61	90.31	90.07	89.97	89.98	90.08	90.20	90.31
20	90.06	90.76	90.84	90.61	90.30	90.06	89.96	89.98	90.07	90.19	90.30

Table 9. Spectral performance of 90° differential phase shift reflector whose thickness to deviate $\lambda_0/4 \times (-0.005)$ from the optimal design.

thickn- ess # with error	wavelength (N):(1+0.94N)×0.633 μm										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	88.24	89.31	89.94	90.31	90.54	90.70	90.81	90.84	90.76	90.56	90.22
2	87.54	88.79	89.64	90.22	90.63	90.94	91.15	91.24	91.18	90.95	90.55
3	86.94	88.18	89.07	89.73	90.24	90.65	90.96	91.14	91.15	90.99	90.63
4	86.41	87.52	88.32	88.93	89.44	89.87	90.22	90.45	90.53	90.44	90.16
5	86.28	87.20	87.83	88.31	88.71	89.06	89.35	89.54	89.60	89.49	89.22
6	86.51	87.26	87.73	88.06	88.33	88.56	88.74	88.83	88.79	88.60	88.26
7	86.95	87.59	87.95	88.18	88.35	88.49	88.58	88.58	88.46	88.18	87.76
8	87.40	87.99	88.30	88.46	88.58	88.66	88.69	88.64	88.46	88.14	87.66
9	87.79	88.36	88.64	88.78	88.86	88.91	88.92	88.84	88.64	88.29	87.79
10	88.10	88.67	88.93	89.05	89.12	89.17	89.16	89.08	88.87	88.52	88.02
11	88.33	88.89	89.16	89.28	89.34	89.38	89.38	89.30	89.10	88.76	88.28
12	88.50	89.06	89.32	89.44	89.51	89.56	89.56	89.49	89.30	88.97	88.52
13	88.61	89.18	89.44	89.56	89.64	89.68	89.69	89.63	89.45	89.14	88.71
14	88.69	89.26	89.52	89.65	89.72	89.78	89.79	89.73	89.57	89.27	88.86
15	88.75	89.31	89.58	89.71	89.78	89.84	89.86	89.81	89.65	89.37	88.97
16	88.78	89.35	89.62	89.75	89.82	89.88	89.90	89.86	89.71	89.43	89.05
17	88.81	89.38	89.65	89.77	89.85	89.91	89.94	89.89	89.75	89.48	89.10
18	88.83	89.40	89.66	89.79	89.87	89.93	89.96	89.92	89.77	89.51	89.14
19	88.84	89.41	89.68	89.80	89.88	89.94	89.97	89.93	89.79	89.53	89.16
20	88.85	89.42	89.68	89.81	89.89	89.95	89.98	89.94	89.80	89.54	89.18

Table 10. Spectral performance of 90° differential phase shift reflector whose thickness to deviate $\lambda_0/4 \times 0.01$ from the optimal design.

thick- ness # with error	wavelength (N); $(1+0.94N) \times 0.633 \mu\text{m}$										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	91.86	91.39	90.52	89.61	88.89	88.45	88.29	88.35	88.57	88.87	89.23
2	93.54	92.67	91.31	89.92	88.79	88.03	87.64	87.57	87.72	88.05	88.50
3	95.09	94.27	92.78	91.16	89.75	88.72	88.08	87.78	87.76	87.94	88.27
4	96.43	96.04	94.78	93.21	91.71	90.52	89.69	89.20	88.98	88.97	89.11
5	96.66	96.88	96.11	94.86	93.55	92.44	91.63	91.12	90.87	90.81	90.90
6	95.88	96.60	96.31	95.47	94.47	93.59	92.96	92.60	92.47	92.52	92.71
7	94.71	95.67	95.66	95.09	94.33	93.66	93.20	93.00	93.01	93.21	93.54
8	93.62	94.67	94.80	94.36	93.74	93.18	92.84	92.73	92.84	93.13	93.55
9	92.75	93.82	94.00	93.63	93.07	92.57	92.27	92.21	92.36	92.68	93.14
10	92.11	93.17	93.36	93.01	92.47	91.99	91.71	91.66	91.82	92.13	92.58
11	91.65	92.70	92.88	92.53	92.00	91.52	91.24	91.18	91.32	91.62	92.03
12	91.33	92.37	92.54	92.19	91.65	91.17	90.88	90.80	90.92	91.19	91.56
13	91.12	92.14	92.31	91.95	91.40	90.92	90.62	90.53	90.63	90.87	91.20
14	90.97	91.99	92.15	91.78	91.23	90.74	90.43	90.33	90.42	90.63	90.94
15	90.87	91.88	92.04	91.67	91.12	90.62	90.31	90.20	90.27	90.47	90.76
16	90.80	91.81	91.96	91.60	91.04	90.54	90.22	90.11	90.17	90.36	90.63
17	90.75	91.76	91.91	91.54	90.99	90.49	90.17	90.05	90.11	90.29	90.54
18	90.72	91.72	91.88	91.51	90.95	90.45	90.13	90.01	90.06	90.24	90.49
19	90.69	91.70	91.85	91.48	90.93	90.43	90.10	89.98	90.03	90.21	90.45
20	90.67	91.68	91.84	91.47	90.91	90.41	90.08	89.96	90.01	90.18	90.43

Table 11. Spectral performance of 90° differential phase shift reflector whose thickness to deviate $\lambda_0/4 \times (-0.01)$ from the optimal design.

thick- ness # with error	wavelength (N); $(1+0.94N) \times 0.633 \mu\text{m}$										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	87.12	88.68	89.79	90.57	91.12	91.47	91.66	91.68	91.49	91.10	90.50
2	85.79	87.71	89.23	90.42	91.32	91.97	92.36	92.49	92.33	91.87	91.14
3	84.70	86.61	88.21	89.53	90.59	91.42	91.99	92.28	92.26	91.93	91.29
4	83.78	85.44	86.85	88.06	89.08	89.91	90.53	90.90	90.99	90.79	90.30
5	83.55	84.87	85.97	86.91	87.71	88.37	88.84	89.10	89.11	88.86	88.37
6	83.96	84.97	85.77	86.43	86.96	87.37	87.61	87.65	87.46	87.03	86.38
7	84.77	85.58	86.18	86.63	86.97	87.18	87.24	87.10	86.73	86.13	85.32
8	85.62	86.34	86.82	87.15	87.37	87.47	87.41	87.15	86.67	85.96	85.05
9	86.38	87.04	87.46	87.74	87.90	87.93	87.81	87.50	86.97	86.21	85.25
10	86.99	87.63	88.02	88.27	88.40	88.41	88.27	87.94	87.40	86.63	85.68
11	87.44	88.08	88.47	88.70	88.83	88.84	88.70	88.37	87.84	87.10	86.18
12	87.77	88.41	88.80	89.04	89.16	89.18	89.05	88.74	88.23	87.52	86.66
13	88.00	88.64	89.03	89.28	89.41	89.43	89.32	89.03	88.55	87.87	87.06
14	88.16	88.80	89.20	89.45	89.59	89.62	89.51	89.24	88.79	88.15	87.37
15	88.27	88.92	89.31	89.56	89.71	89.75	89.65	89.40	88.96	88.34	87.61
16	88.35	88.99	89.39	89.64	89.79	89.83	89.75	89.50	89.08	88.49	87.78
17	88.40	89.05	89.45	89.70	89.85	89.90	89.81	89.58	89.16	88.58	87.90
18	88.44	89.08	89.48	89.74	89.89	89.94	89.86	89.63	89.22	88.65	87.98
19	88.47	89.11	89.51	89.76	89.91	89.96	89.89	89.66	89.26	88.70	88.03
20	88.48	89.13	89.53	89.78	89.93	89.98	89.91	89.68	89.29	88.73	88.07

는 박막층에 두께 오차가 포함되었을 때 최적치로부터 큰변위를 갖게 됨을 보여준다.

Ⅶ. 결 론

유전체 다층 박막을 이용하여 광피의 편극상태를 변화시켜 줄 수 있는 박막계를 설계하였다. 즉 중심파장이 0.633 μm 인 영역($\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \approx 0.1$)에서 선형 편극된 광파가 45°각도로 입사할 때 원형편극으로 반사시키는 박막계를 설계하였다. 설계된 박막계는 이 영역에서 각 편극에 반사율이 99.95%이상이었으며 위상변위차는 90° \pm 0.15° 이내에서 진동함을 보여주었다.

그리고 두께 오차에 대한 spectral performance 도 계산하였는데 각 박막층의 최적두께의 0.5%, 1%, 2% 이내의 uniform random error가 포함된 두께를 가진 박막계는 위상변위차가 각각 90°와 91°, 90°와 92° 및 90°와 94°도 사이에서 진동하고 있음을 보여 주었다. 그리고 한 박막층만의 두께가 최적두께로 부터 일정한 크기로 변화된 두께를 갖는 박막계의 성능을 20개의 전박막층에 대하여 계산한 결과 오차비율이 커질수록 위상변위차가 최적으로 부터 큰 변위를 갖는 것을 알았다. 그리고 두

께에 포함된 오차의 비율과 크기에 큰 영향을 받는 박막층은 양쪽 가장자리 박막층보다는 가운데 박막층 즉 박막층수가 4~10에 속하는 박막층임을 알았다. 따라서 실제 박막계를 제작할 때 가운데 박막층에 대해서 더욱 정밀하게 thickness monitoring을 하여야 함을 알았다.

참 고 문 헌

- [1] H. A. Macleod, "*Thin Film Optical Filters*", American Elsevier, New York (1969).
- [2] Sang Soo Lee, *New Phys.*, **12**, 98 (1972).
- [3] H. M. Liddell, "*Computer-aided Techniques for the Design of Multilayer Filters*", Adam Hilger, Bristol (1981).
- [4] Z. Knittl, "*Optics of Thin Films*", John Wiley & Sons, London (1976).
- [5] T. R. Ferguson, *Opt. Eng.*, **21**, 963(1982).
- [6] M. Born and E. Wolf, "*Principles of Optics*", Chap. 1, Pergamon Press, Oxford(1975).
- [7] Sung Hong Hahn and Sang Soo Lee, *New Physics*, **23**, 155 (1983).