

다층박막계를 이용한 비편광 광분리기의 설계**

한성홍 · 김석원 · 최양오*

울산대학교 물리학과

나 승 유

포항공과대학 방사광가속기연구소

(1993년 5월 6일 받음)

유전체 다층박막에 빛이 사각으로 입사할 경우 편광에 의존하는 현상이 나타나므로 사용하기에 바람직하지 못하다. 본 연구에서는 이러한 편광효과를 줄이기 위하여 기존의 몇가지 설계법을 이용하여 비편광 광분리기를 설계해 보고 이 방법들을 응용하여 박막의 광학적두께가 $\lambda/4$ 로 일정할 때 최외각 등가층의 반사율을 조절하는 방법을 사용하여 비편광 광분리기를 설계하였다.

I. 서 론

일반적으로 많은 광학계에서 넓은 파장의 범위에서 동작할 수 있는 광분리기(beam splitter)를 필요로 한다.^[1,4] 만약 광흡수가 문제되지 않는다면 금속-유전체 박막코팅이 적당하고 제작하기 쉬울 것이다. 그러나 금속박막 내에서는 광의 흡수가 일어나며 레이저나 전기-광학적 응용의 경우에 대하여 이러한 광흡수가 있는 분리기는 사용하기에 적당치 않다.^[5] 그래서 흡수가 없고, 큰 열적저항(thermal load)을 가지며 산화(oxidation)가 적은^[4] 유전체 박막이 설계에 사용된다.

고반사경이나 프리즘의 경우 일반적으로 높은 굴절률을 가지는 물질의 1/4파장 층(H)과 낮은 굴절률을 가지는 물질의 1/4파장 층(L)을 반복하여 코팅하는 방법, 즉 (HL)ⁿ을 사용하여 고반사율이 되도록 설계한다.^[1,4] 광분리기도 이와 유사한 다층박막으로 설계되어지나 이 경우에는 이러한 H, L외에 H와 L의 중간 굴절률을 가지는 매질(M)을 도입하여 H, M, L의 적당한 조합을 계산하는 설계방법이 많이 사용되고 있다.

유전체 다층박막에 빛이 사각(斜角)으로 입사할 경우 편광에 의존하는 현상이 나타난다. 많은 경우에 이러한 편광현상은 바람직하지 못하며 이러한 효과를 줄이기

위해서 입사광의 편광에 의존하지 않는 비편광 광분리기(nonpolarizing beam splitter)가 설계되고 제작되어 왔다.^[5,8] 특히 1976년 Thelen^[9]은 $\lambda/4$ 층 만을 이용하는 비편광 광분리기를 설계하였으며, Knittl과 Houserkova^[10]는 사각에서 낮은 편광효과를 가지는 삼층 등가주기(three layer equivalent period)를 합성하는 설계법을 제안하였다. 1983년 de Sterke^[5] 등은 최외각의 두층을 조절하여 최적화하는 방법으로 광분리기를 설계하였다.

본 논문에서는 최외각 등가층(equivalent layer)을 조절하는 광분리기의 설계방법에 대하여 논의하고자 한다.

II. 다층박막계의 반사율 및 투과율

그림 1과 같이 기판위에 m층의 유전체 박막으로 구성된 박막계에 평면파 전기장이 입사할 때 공기층의 하단부에서의 입사전장과 반사전장의 크기를 각각 E_0^+ 와 E_0^- , 임의의 j번째 층의 하단부에서의 입사전장과 반사전장의 크기를 각각 E_j^+ 와 E_j^- , 기판 상단부에서의 입사전장의 크기를 E_{m+1}^+ 이라 표시한다. 단 $E_{m+1}^- = 0$ 이다. 이때 박막행렬 이론으로부터 다음식을 얻을 수 있다.^[11]

$$\begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & U_0^{-1} \\ 1 & -U_0^{-1} \end{pmatrix} \prod_{j=1}^m A_j \begin{pmatrix} 1 \\ U_{m+1} \end{pmatrix} E_{m+1}^+$$

* 현주소 : 대우전자(주) 중앙연구소

** 본 연구는 1990년도 한국과학재단의 일반기초연구비의 지원에 의해서 수행되었음.

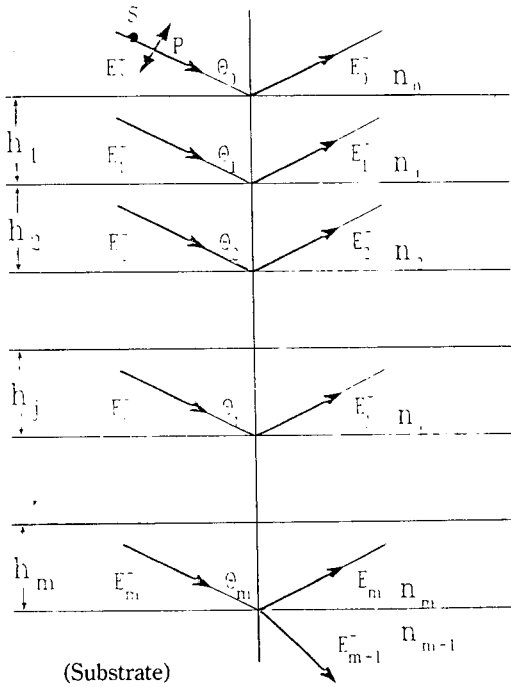


그림 1. 다층 박막계

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

$$(j=1, 2, 3 \dots m, i=\sqrt{-1})$$

여기서 U_j 는, 매질에서의 입사각이 θ_j 일 때, j 번째 층에서의 admittance로서 S-편극에 대해서는 $U_j = n_j \cos \theta_j$, P-편극에 대해서는 $U_j = n_j \sec \theta_j$ 가 되며 g_j 는 아래와 같이 표현된다.

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

만약 기판이 흡수가 있는 물질이라면 기판의 admittance U_{m+1} 은 복소수

$$U_{m+1} = U_R + iU_I \quad (3)$$

로 나타낼 수 있으며 기판의 흡수가 없다면 $U_I = 0$ 이다.

(1) 식에 표현된 박막행렬 A_j 는 대각선 요소들이 실수이고 나머지가 허수이므로 이 행렬들의 곱을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$A = \prod_{j=1}^m A_j = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & i\alpha_{12} \\ i\alpha_{12} & \alpha_{11} \end{pmatrix} \quad (4)$$

(α_{kl} 은 실수, $k, l=1, 2$)

기판이 흡수가 없는 광학유리라 하면 (3)식의 $U_I = 0$ 이 된다. 이때 (3)식과 (4)식을 (1)식에 대입하고 M_{kl} ($k, l=1, 2$)를 다음과 같이 정의하면

$$\begin{aligned} M_{11} &= U_0 \alpha_{11} + U_R \alpha_{22} \\ M_{12} &= \alpha_{12} + U_0 U_R \alpha_{21} \\ M_{21} &= U_0 \alpha_{11} - U_R \alpha_{22} \\ M_{22} &= -\alpha_{21} + U_0 U_R \alpha_{12} \end{aligned} \quad (5)$$

(1)식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} E_0^+ \\ E_0^- \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} M_{11} + iM_{12} \\ M_{21} + iM_{22} \end{pmatrix} \frac{E_{m+1}^+}{U_0} \quad (6)$$

따라서 각 편극에서의 반사율 및 투과율은 다음과 같이 표현된다.

$$R_{s,p} = \left(\frac{M_{21}^2 + M_{22}^2}{M_{11}^2 + M_{12}^2} \right)_{s,p}, \quad T_{s,p} = \left[\frac{U_R}{U_0} \left(\frac{4}{M_{11}^2 + M_{12}^2} \right) \right]_{s,p} \quad (7)$$

III. 비편광 광분리기의 설계

1 Neutral beam splitter

어떤 파장범위내에서 파장의 변화에 무관하게 입사파의 세기를 일정한 비율로 두 부분(반사광과 투과광)으로 나누는 부품을 광분리기(neutral beam splitter)라 한다. 금속박막으로는 넓은 파장영역에서 동작할 수 있는 아주 좋은 광분리기를 제작할 수 있으나 흡수로 인하여 높은 광손실을 가지며, 열적 저항이 크고 산화에 견디기 어려워 응용상의 문제가 발생한다. 따라서 비록 사용할 수 있는 파장의 범위는 좁지만 이러한 문제를 해결할 수 있는 방안으로 유전체 다층박막 광분리기가 사용된다. 보통 광분리기는 $\lambda/4$ 광학적 두께를 가지는 박막을 이용하여 설계한다.

우선 수직입사의 경우 $\lambda = 5000 \text{ \AA}$ 를 중심으로 $\lambda/4$ 의 광학적두께를 가지는 5층의 airy |L H L H 2L| Glass(1.52) 구조를 가지는 광분리기를 설계해 보았다. 여기서 높은 굴절률을 가지는 물질의 굴절률(n_H)은 2.35, 낮은 굴절률을 가지는 물질의 굴절률(n_L)은 1.38이다. 이 설계의 계산 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 입사파는 기준파장 위치에서 약 50%의 반사율($R = 50\%$)로 분리됨을 알 수 있다.¹ 또한 그림 2에는 45도 입사때의 S-편광과 P-편광의 반사율도 각각 나타내었다. 사각(45도)입사때 각편광의 반사율이 서로 다르고 또 50%에서 크게 벗어나기 때문에 비편광분리기가 필요함을

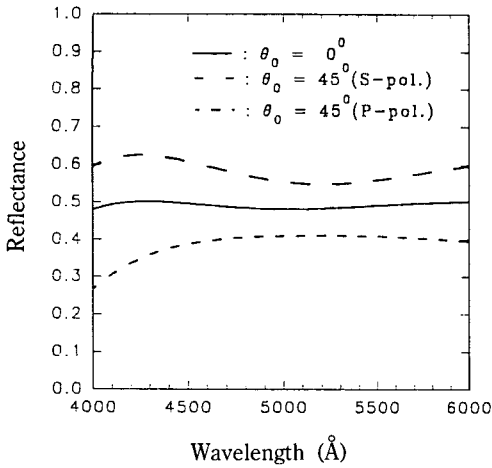


그림 2. Neutral beam splitter

1.0|L H L H 2L|1.52, R=50%

실선 : 기준파장 5000 Å, 입사각 0°, $n_L=1.38$, $n_H=2.35$

점선 : 기준파장 5000 Å, 입사각 45°, $n_L=1.38$, $n_H=2.35$

알 수 있다.

2. 최외각 등가층을 이용한 비편광 광분리기의 설계

모든 층이 $\lambda=6328 \text{ \AA}$ 에 대하여 $\lambda/4$ 의 광학적두께를 가지며 최외각의 등가층의 굴절률을 변화시키는 방법으로 비편광 광분리기를 설계하였다.

설계 방법은 다음과 같다.

a) 굴절률표로부터 굴절률 차가 큰 두 물질(H, L)을 선택한다.

b) 앞의 두 설계 방법에 의하여 적당한 중간 굴절률(M)을 가지는 물질을 선택한다.

c) (H M L M)을 등가층으로 하는 $1.52|(H M L M)^{n-1}(H M L M)|1.52$ 을 기본 stack으로 하는 구조를 구성한다. 여기서 양쪽을 유리매질로 한 것은 정육면체 광분리기(cube beam-splitter)에 적용하기 위해서이다.

d) 기본 stack $1.52|(H M L M)^{n-1}(H M L M)|1.52$ 의 등가층의 층수를 조절하여 원하는 적당한 반사율, 또는 투과율을 구한다.

e) 마지막 등가층 (H M L M)에서 L, H와 M을 적당히 조절하여 원하는 시스템을 완성한다.

2.1 Design 예 (R : T = 60 : 40)

물질의 굴절률을 표로부터 굴절률의 차가 큰 즉, The- len의 조건을 만족하는 물질을 선택한다. 이러한 조건을

만족하는 stack은 빛의 진행에 전혀 영향을 미치지 않으므로, 따라서 편광현상을 줄일 수 있다. 본 연구에서는 위의 조건을 만족하고, 쉽게 구할 수 있으며 많이 쓰이는 물질을 선택하였다. 우선, 높은 굴절률 (H)을 가지는 물질로는 TiO_2 (2.3)을 선택하였으며, 낮은 굴절률 (L)을 가지는 물질로는 MgF_2 (1.38)을 선택하였다. 그리고, 앞의 두 설계 방법에 의하여 적당한 중간 굴절률 (M)을 가지는 물질을 선택한다. 우리는 $n_M=1.60$ 을 가지는 물질을 선택하였다.

이제, 우리가 요구하는 세가지 물질 (L M H)이 선택 되었으므로 (H M L M)을 등가층으로 하는

$$1.52|(H M L M)^{n-1}(H M L M)|1.52 \tag{8}$$

$$(n_H=2.3, n_L=1.38, n_M=1.6, n_0=n_s=1.52,$$

$$\text{입사각}=45^\circ, \text{ 기준파장}=6328\text{\AA})$$

의 구조를 가지는 stack을 구성한다. 이렇게 함으로서 우리는 기준 파장에서 반사율 R_s 와 R_p 가 거의 대칭적으로 균형을 이룬다는 것을 알 수 있다. 그리고 반사율 또는 투과율을 계산하여 기준파장에 대한 S-편광과 P-편광에 대한 그래프를 그린다. 본 연구에서는 R_s 와 R_p 에 대한 그래프를 이용하였다. 여기서, $n=5$ 인 경우 반사율 R이 거의 60%에 가까워지고, $n=4$ 인 경우 반사율 R이 50%에 가까워진다. 그리고 R_s 와 R_p 사이에는 편광 현상이 생긴다.

R_s 와 R_p 사이의 편광 현상을 줄이는 방법에는 최적화 (optimization) 프로그램을 이용하여 양쪽 두 최외각층을 최적화하거나, 마지막 등가층을 최적화하는 방법 등이 있다. 이러한 방법은 등가층의 광학적두께를 변화시켜 R_s 와 R_p 를 최적화하는 방법이다. 그러나 본 연구에서는 층의 두께를 변화시키지 않고, $\lambda/4$ 의 광학적 두께를 유지하면서 마지막 등가층의 굴절률 L, H와 M을 변화시키는 방법을 사용하였다.

앞에서 설계한 박막구조 $1.52|(H M L M)^4(H M L M)|1.52$ 의 stack은 R_s 와 R_p 가 편광현상에 의해 약간 다른 형태를 보인다. 따라서 이 stack을

$$1.52|(H M L M)^4(H M L' M)|1.52 \tag{9}$$

또는

$$1.52|(H M L M)^4(H M' L M)|1.52 \tag{10}$$

또는

$$1.52|(H M L M)^4(H M' L' M)|1.52 \tag{11}$$

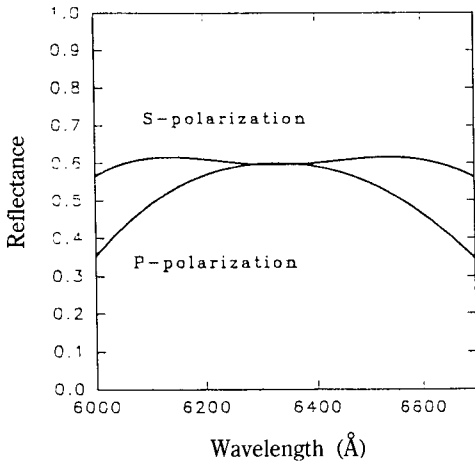


그림 3. 최외각 등가층을 이용한 비편광 광분리기
 $1.52a13 : (H M L M)^4 H M' L' M' | 1.52, R=60\%$
 기준 파장: 6328 \AA , 입사각: 45° , $n_L=1.38, n_M=1.6, n_H=2.3, n_{L'}=1.35, n_{M'}=1.62$

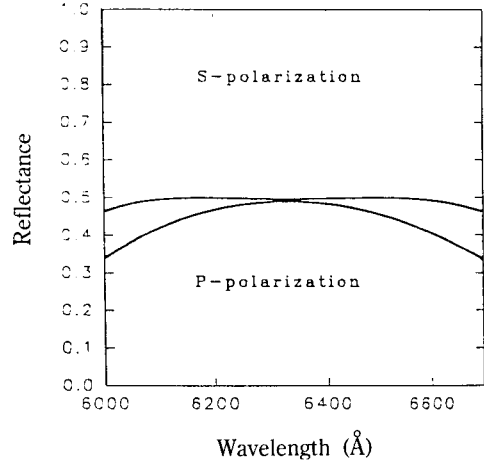


그림 5. 최외각 등가층을 이용한 비편광 광분리기
 $1.52|(H M L M)^3 H M' L' M'| 1.52, R=50\%$
 기준 파장: 6328 \AA , 입사각: 45° , $n_L=1.38, n_M=1.62, n_H=2.35, n_{M'}=1.6$

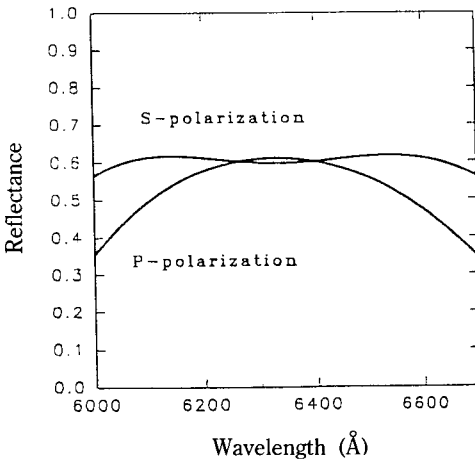


그림 4. 최외각 등가층을 이용한 비편광 광분리기
 $1.52|(H M L M)^4 H M L' M'| 1.52, R=60\%$
 기준 파장: 6328 \AA , 입사각: 45° , $n_L=1.38, n_M=1.6, n_H=2.3, n_{L'}=1.33$

의 구조를 가지게 약간 변화시킨 후 기준파장에 대한 R_s 와 R_p 를 계산하였다. 여기서, M' 과 L' 은 M, L 이외의 굴절률을 가지는 물질의 $\lambda/4$ 광학적두께를 뜻한다. 위의 stack에서 L 의 변화는 기준파장에 대하여 R_s 와 R_p 가 겹치는 정도를 변화시켜 주며, M 은 기준파장에 대하여 R_s 와 R_p 가 대칭적인 성질을 갖도록 해준다. 그림 3, 그림

4는 위의 방법을 이용하여 설계한 비편광 광분리기이다.

2.2 Design 예 (R : T = 50 : 50)

위의 설계 예의 (8)식에서 $n=4$ 인 경우 반사율 $R=50\%$ 에 가까워진다. 그러므로 반사율이 50%인 이 설계결과는 다음과 같은 stack을 가진다.

$$1.52|(H M L M)^3 (H M L M)| 1.52 \quad (12)$$

($n_H=2.35, n_L=1.38, n_M=1.62, n_0=n_s=1.52$,
 입사각= 45° , 기준파장= 6328 \AA)

의 구조를 가지는 stack을 구성한 후 반사율 또는 투과율을 계산하여 기준파장에 대한 S-편광과 P-편광에 대한 그래프를 그린다. 앞에서와 마찬가지로 stack은 R_s 와 R_p 사이에 약간의 편광현상이 생긴다. 따라서, 이 stack을

$$1.52|(H M L M)^3 (H M L' M)| 1.52 \quad (13)$$

또는

$$1.52|(H M L M)^3 (H M' L M')| 1.52 \quad (14)$$

또는

$$1.52|(H M L M)^3 (H M' L' M')| 1.52 \quad (15)$$

의 구조를 가지게 변화시켜 기준파장에 의한 R_s 와 R_p 를 계산하였다. 여기서도, M' 과 L' 은 M, L 이외의 굴절률을 가지는 물질을 뜻한다. 위의 stack에서 L 의 변화는 기준파장에 대하여 R_s 와 R_p 가 겹치는 정도를 변화시켜 주

고, 반사율을 전체적으로 조금씩 변화시켜준다. 즉 M 의 값이 증가하면 반사율도 증가하고, M 의 값이 감소하면 반사율은 감소한다. 그림 5는 $R=50\%$ 의 광분리기이다.

IV. 결 과

본 연구의 설계 방법, 즉 전체 각 층의 두께가 $\lambda/4$ 광학적 두께를 가지는 stack에서 최외각 등가층을 이용한 비편광 광분리기 설계 결과는 반사율 $R=60\%$ 에서 R_s 와 R_p 가 거의 일치함을 보여준다. 그림 3에서 stack의 구조는

$$1.52|(H M L M)^4 (H M' L' M')|1.52$$

즉,

$$1.52|(2.3, 1.6, 1.38, 1.6)^4 (2.3, 1.62, 1.35, 1.62)|1.52$$

의 구조를 가지며 광학적 두께는 모두 $\lambda/4$ 이다. 여기서 기준파장 $\lambda=6328 \text{ \AA}$ 이며, 입사각은 45° 이다. 이 파장에서 위의 stack은 $R_s=0.59556$, $R_p=0.60040$ 이다. 따라서 R_s 와 R_p 사이에는 거의 편광현상이 나타나지 않음을 알 수 있다. 즉, 이 stack은 $\lambda=6328 \text{ \AA}$ 에서 비편광 광분리기의 성능을 나타낸다. 그림 4에서 stack의 구조는

$$1.52|(H M L M)^4 (H M L' M')|1.52$$

즉,

$$1.52|(2.3, 1.6, 1.38, 1.6)^4 (2.3, 1.6, 1.33, 1.6)|1.52$$

의 구조를 가지며 이것 또한 모두 $\lambda/4$ 광학적 두께이다. 기준파장 $\lambda=6328 \text{ \AA}$ 이며, 입사각은 45° 이다. 이 파장에서 stack은 $R_s=0.579$, $R_p=0.610$ 이다. 그러므로 이 stack도 역시 기준파장에서 R_s 와 R_p 사이에는 거의 비편광임을 알 수 있다. 따라서 이 stack도 $\lambda=6328 \text{ \AA}$ 에서 비편광 광분리기의 성능을 나타낸다.

위의 두 경우에서 그림 3은 5가지의 박막코팅물질이 필요하나, 그림 4는 4가지의 물질만을 필요로 한다. 그러므로 비편광 광분리기의 성능은 그림 3이 좋으며, 코팅의 기술적인 면으로 보면 그림 4가 용이하다. 그리고 그림 5는 전체 16층의 박막으로서

$$1.52|(H M L M)^8 (H M' L' M')|1.52$$

즉,

$$1.52|(2.35, 1.62, 1.38, 1.62)^8 (2.35, 1.62, 1.38, 1.6)|1.52$$

의 구조를 가지며 광학적 두께는 모두 $\lambda/4$ 이다. 여기서 기준파장은 $\lambda=6328 \text{ \AA}$ 이며 입사각은 45° 이다. 이 파장에서 stack은 $R_s=0.496$, $R_p=0.490$ 이다. 그러므로 $\lambda=6328 \text{ \AA}$ 에서 R_s 와 R_p 사이에는 거의 편광현상이 없음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 다층박막의 기본적인 이론을 제시하고 삼 등가층을 이용한 비편광 광분리기 설계 방법과 stack의 양쪽 매질에 접하는 두 외각층을 최적화하는 설계 방법에 대하여 알아보았다. 그리고 최외각 등가층을 이용하여 비편광 광 분리기를 설계하는 새로운 방법을 도입하였다. 최외각의 등가층에서 L 과 M 을 변화시킴으로써 $R:T=60:40$ 에서 매우 만족할 만한 결과를 얻었으며 최외각의 등가층 중 M 만을 변화시키면서 모든 층이 $\lambda/4$ 로 이루어지도록 하여 $R:T=50:50$ 을 만족하는 설계 결과를 얻었다.

참 고 문 헌

- [1] A. Thelen, *Design of Optical Interference Coating* (McGraw-Hill, New York, 1989) pp. 110-122.
- [2] Z. Knittl, *Optics of Thin-films* (John Wiley & Sons, London, 1979), pp. 384-405.
- [3] H. A. Macleod, *Thin-film Optical Filters* (American EOlsevier, New York, 1986), pp. 148-156.
- [4] M. Zukic and K. H. Guenther, *Opt. Eng.* **28**, 165 (1989).
- [5] C. M. de Sterke, C. J. van der Lann, and H. J. Frankena, *Appl. Opt.* **22**, 595 (1983).
- [6] P. Baumeister, *Opt. Acta.* **8**, 105 (1961).
- [7] V. R. Costich, *Appl. Opt.* **9**, 866 (1970).
- [8] M. Gilo, *Appl. Opt.* **31**, 5345 (1992).
- [9] A. Thelen, *Appl. Opt.* **15**, 2983 (1976).
- [10] Z. Knittl, H. Houserova, *Appl. Opt.* **21**, 2055 (1982).
- [11] 김석원, 한성홍, 이상수, *새물리* **25**, 78 (1985).

**Design of Nonpolarizing Beam Splitter Using the
Multilayer Thin Film System**

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

Seung Yu Rah
Pohang Institute of Science and Technology, Pohang 790-600, Korea

(Received: May 6, 1993)

The reflectance and transmittance of dielectric films at nonzero angle of incidence show strong polarization effects, and for many applications these effects are not desirable. In this work, some design methods are introduced, and we designed the nonpolarizing beam splitter using the outest equivalent quarter-wave layers. During this, the reflectances are varied under the constant optical thickness.