

λ₀/4 두께 유전체 다층 박막계를 이용한 전방향 거울의 설계 Design of Omnidirectional Mirror Using Quarter-wave Dielectric Stacks

김성화, 황보창권
인하대학교 물리학과
joke100@chollian.net

일반적으로 광통신이나 고출력 레이저에 사용되는 광학 소자들 중 고반사율의 거울은 특정 파장과 특정 각도에 대해서만 민감하도록 설계되어 있다. 이것을 여러 파장의 빛을 여러 각도로 입사시키더라도 높은 반사율을 얻는다면, 소자의 효율을 향상시키는데 상당한 효과를 볼 수 있다.

은이나 알루미늄의 금속박막으로 제작되는 금속 거울은 제작하기 쉽고 입사파장과 금속의 재질에 관련되어 90 %이상의 반사율을 갖지만, 특정한 각도에서는 빛이 금속 내에 있는 자유 전자들에 의해 상당량 흡수되어 버린다. 따라서 금속 거울은 에너지의 손실이 적어야 하는 광통신이나 고출력 레이저와 같은 응용분야에는 사용될 수 없다. 이러한 흡수가 거의 없는 유전체 거울은 고굴절률과 저굴절률의 층이 λ₀/4의 광학 두께를 가지고 주기적으로 반복되는 구조를 갖는다. 이러한 λ₀/4 유전체 다층 박막계는 1-차원 photonic 결정 구조와 동일하게 다룰 수 있는데, 1-차원 photonic 결정 구조가 모든 입사각도에 대해서 전방향 반사를 보인다는 것을 이론과 실험적으로 증명하였다[1-3].

굴절률이 n_H인 H 층과 n_L인 L 층으로 구성된 기본 주기 (HL)^S가 [공기(HL)^S기판]의 λ₀/4 구조를 가질 때, 기본구조의 특성행렬은

$$[M] = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_H & i \sin \delta_H / \eta_H \\ i \eta_H \sin \delta_H & \cos \delta_H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_L & i \sin \delta_L / \eta_L \\ i \eta_L \sin \delta_L & \cos \delta_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

으로 표현된다[4]. 여기서 δ_H와 δ_L는 박막의 위상 두께인데, 박막이 λ₀/4의 광학두께를 가질 때는 δ_k = (π/2)g cos θ_k으로 주어진다. k는 H와 L이며, g는 상대파장수이며, g=λ₀/λ으로 정의한다. λ₀는 광학 코팅 설계에서 사용되는 기준파장이다. 그리고, η_H와 η_L는 유효굴절률이며, 각각의 편광에 대해서,

$$\eta_i = \begin{cases} n_i \cos \theta_i & (s\text{-편광}) \\ \frac{n_i}{\cos \theta_i} & (p\text{-편광}) \end{cases} \quad (2)$$

이다. 굴절각도 θ_H와 θ_L는 Snell의 법칙으로 주어진다.

λ₀/4 유전체 다층 박막계의 스펙트럼에서, 투과영역과 반사영역의 경계는

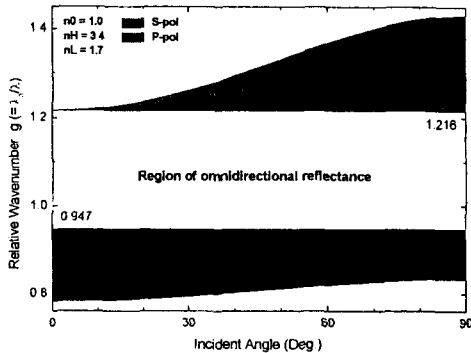
$$\frac{M_{11} + M_{22}}{2} = -1 \quad (3)$$

으로 주어진다[4]. 그러면 식 (1)로부터 M₁₁과 M₂₂를 구하여 식 (3)에 대입시켜 정리하면, 식 (4)를 얻게 된다. 이 식은 λ₀/4 유전체 다층 박막계에 입사되는 빛에 대해서 상대파장수, 편광상태, 그리고 입사각도

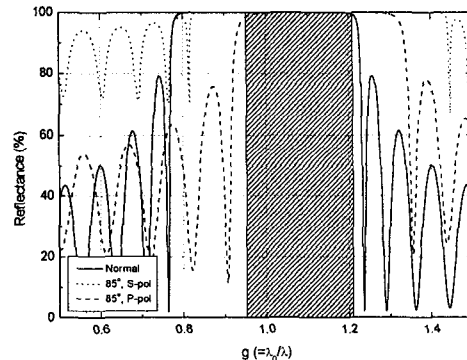
$$\cos \delta_H \cos \delta_L - \frac{1}{2} \left(\frac{\eta_L}{\eta_H} + \frac{\eta_H}{\eta_L} \right) \sin \delta_H \sin \delta_L = -1 \quad (4)$$

등 모든 변수들이 포함되어 있는 일반적인 식이다. 그림 1은 $\lambda_0/4$ 두께를 갖는 굴절률 $n_H=3.4$ 와 $n_L=1.7$ 인 경우에 입사각도 θ_0 에 따른 s-편광과 p-편광에 대한 반사 영역의 경계 상대파장수 g_E 를 수치적 해석을 통해 얻은 그림이다. 입사각도가 증가함에 따라 빛은 s-편광과 p-편광으로 나누어지며, 두 편광에 대해서 고반사율 영역은 모두 높은 상대파장수쪽으로 이동한다. 두 편광과 모든 각도에 대해서 전반사가 일어나는 영역은 수직입사일 때의 높은 상대파장수에서부터 입사각도가 90° 에서의 p-편광된 빛의 낮은 상대파장수까지이다. 그림 2는 $\lambda_0/4$ 다층 구조에 대해서 수직입사와 85° 로 입사될 때의 반사율을 보여주고 있다. 여기서 전방향 반사영역의 폭은 사용되는 물질의 굴절률 n_H 과 n_L 에 의존하는데, 두 굴절률의 비 (n_H/n_L)이 클수록 그 폭은 넓어진다.

전방향 반사거울에 대한 응용분야는 아직 넓지는 않으나 효용성 면에서 상당히 높은 가치가 있다. $\lambda_0/4$ 유전체 다층 박막계는 주로 열 반사거울에 적용될 수 있는데, 태양열 집광기에 들어가는 알루미늄 거울을 유전체 거울로 대체함으로써 효율성과 내구성을 향상시킬 수 있다. 또한, 태양전지에 들어가는 소자들에 대한 UV와 적외선을 차단하는 역할로 이용할 수 있다. 광전기 분야에 있어서, VCSEL이나 광 스위치 등과 같은 소자의 성능을 향상시키기 위한 거울로 사용될 수 있으며, 또한 광섬유에서 빛의 흡수에 의한 광신호 세기의 감소를 방지할 수 있다. 한편, 이러한 주기적 구조의 $\lambda_0/4$ 유전체 다층 박막계는 최근 photonic 밴드갭(PBG)에 적용되어 많은 연구들이 진행되고 있다.



[그림 1] $\lambda_0/4$ 두께 유전체 박막계에 대한 전방향 반사 영역. 바깥쪽 영역은 s-편광이고, 안쪽 영역은 p-편광이다. ($n_H=3.4, n_L=1.7$)



[그림 2] 수직입사와 85° 입사인 경우, $\lambda_0/4$ 유전체 다층 박막계에 대한 반사율.

[공기|(HL)¹⁰|기판]

($n_H=3.4, n_L=1.7, n_S=1.52, \lambda_0=550 \text{ nm}$)

<참고 문헌>

- [1] J. N. Winn et al., "Omnidirectional reflection from a one-dimensional photonic crystal", Opt. Lett., 23(20), 1573(1998).
- [2] E. Yablonovitch, "Engineered omnidirectional external-reflectivity spectra from one-dimensional layered interference filters", Opt. Lett., 23(21), 1648(1998).
- [3] D. N. Chigrin et al., "Observation of total omnidirectional reflection from a one-dimensional dielectric lattice", Appl. Phys. A, 68, 25(1999).
- [4] H. A. Macleod, "Thin-Film Optical Filters", 2nd ed., Macmillan, New York (1986).