

최적화 기법을 이용한 두 파장 분할광학 박막 필터의 설계 및 제작

한 성 홍

물리학과

(1985. 4. 30 접수)

〈요 약〉

광파장분할 다중화용 광학간섭박막계를 설계 제작하였다. 입사각 45°, 15층의 $\left(\frac{H}{2}L\frac{H}{2}\right)^7$ 형은 0.85 μm 와 1.30 μm 에서 반사율이 각각 99.16%, 0.38%의 계산치를 나타내었으며, 이 data를 이용한 결과 각 파장에 대해 반사율이 각각 94.01% 2.60%의 실험치를 얻었다. 그리고 $\frac{H}{2}(LH)^7$ 형은 0.85 μm 과 1.50 μm 에서 계산치 99.09%, 1.27%, 실험치 97.5%, 3.30%의 반사율을 나타내었다. 한편 각 파장영역을 넓히기 위해 17층으로 5개의 matching layer를 고려했을 때 반사율이 99% 이상이 0.76~0.92 μm 영역에서, 1%이하가 1.18~1.40 μm 영역인 박막제와 99%이상이 0.80~0.91 μm 영역에서, 1%이하가 1.34~1.58 μm 영역인 박막계를 설계하였다.

Optical Multilayer Thin Film Systems for Wavelength Division Designed using the Optimization Technique

Sung Hong Hahn

Dept. of Physics

(Received April 30, 1985)

〈Abstract〉

The dichroic interference filters which can be used as two channel wavelength division multiplexer are designed and the reflectances are determined both numerically and experimentally. The calculated reflectance and its experimental reflectance of $\left(\frac{H}{2}L\frac{H}{2}\right)^7$ type filter, at 45° incidence, are 99.16%, 94.01% respectively at 0.85 μm and 0.38%, 2.60% respectively at 1.30 μm . And the calculated reflectance and its experimental reflectance of $\frac{H}{2}(LH)^7$ type one are 99.09%, 97.5% respectively at 0.85 μm and 1.27%, 3.30% respectively at 1.5 μm . In order to treat wider wavelength region, two 17 layer dichroic filters, which have 5 matching layers, are designed at 45° incidence. The calculated reflectance of one is more than 99% in the region 0.76~0.92 μm and less than 1% in 1.18~1.40 μm , and the calculated reflectance of another is more than 99% in 0.80~0.91 μm and less than 1% in 1.34~1.58 μm .

I. 서 론

최근에 광섬유 케이블의 제조기술이 발달하여 0.7 μm 에서 1.7 μm 사이의 넓은파장 영역에 걸쳐 저손

실(5dB/km)을 갖게 되었으며, 광원도 반도체 레이저의 개발이 촉진되어 이 영역에서 파장조절이 가능하며 또한 단일 광섬유 전송로로 여러가지 파장의 통신 신호를 전달할 수 있게 되었다⁽¹⁾ 따라서 이러한 광분할통신에 필요한 분파기로서 광학박막필터

형, 프리즘형, 회절격자형 등을 사용할 수 있겠지만^(2,3) 광학박막필터가 소형크기 제작의 용이성, 에너지 손실면에서 유리하다.^(4,5)

본 연구에서는 $0.85\mu\text{m}$ 와 $1.30\mu\text{m}$ 의 광파를 분할하는 박막필터와 $0.85\mu\text{m}$ 과 $1.50\mu\text{m}$ 의 광파를 분할하는 박막필터를 설계 및 제작하였다. 설계 과정에서, 진공 증착시 optical monitoring을 쉽게 하면서, 선택파장(monitored wavelength)을 정확히 구하기 위해 다층 박막계의 양쪽 끝 박막층을 matching layer로 하여 최적화 기법을 도입하여 계산하였다. 박막계산에 이용한 최적화 기법에는 여러 가지 방법이 있지만^(6,7,8) 변수의 수가 적은 경우 안정성을 유지하면서 빨리 수렴하는⁽⁹⁾ 2계 미분도함수를 이용한 damped least square method를 이용하였다.

그리고 이들 수치계산에 따라 진공증착기를 사용하여 광분할 박막 필터를 제작하였고, 이 박막필터의 spectral performance를 spectrophotometer로 측정하였다.

나아가 중심파장 특히 $1.30\mu\text{m}$ 나 $1.50\mu\text{m}$ 파장 영역을 넓히기 위해 matching layer⁽¹⁰⁾를 5개로 늘려서 계산하였다. 이들의 제작은 monitoring plate를 여러개 사용할 수 있는 진공증착기로 제작이 가능하지만 이와 같은 조건을 만족하는 박막필터를 제작할 경우 파장이 고정되지 않은 tunable semiconductor laser를 광원으로 사용할 수 있으므로 더 많은 응용이 가능할 것이다.

II. 박막계에서의 반사율과 투과율

그림 1과 같이 기판 위에 m 층의 유전체 박막이 있는 박막계를 생각하자. 이 박막들이 $y-z$ 평면에 무한히 평행하다고 할 때 이 박막계에 광파가 입사하는 경우 j 번째 층의 경계면에서 입사, 반사하는 전장의 크기를 각각 E_j^+ , E_j^- 라고 하고 $(m+1)$ 번째 층에서는 반사파가 없다고 가정하면 다음과 같은 관계식을 얻는다.⁽¹¹⁾

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

$$A_j = \begin{pmatrix} \cos \phi_j & iY_j \sin \phi_j \\ iY_j \sin \phi_j & \cos \phi_j \end{pmatrix} \quad (2)$$

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

여기서 Y_j 는 P 편극에 대해서는 $n_j \sec \theta_j$, S 편극에 대해서는 $n_j \cos \theta_j$ 로 주어지는 j 번째 층에

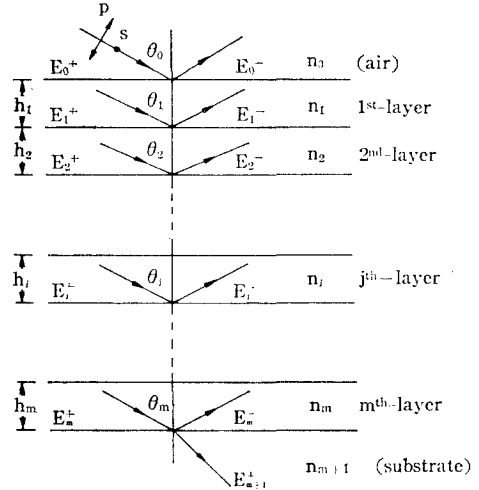


Fig. 1. Electric fields in the thin film system.

서의 admittance 있다. n_j 와 θ_j 는 j 번째 층의 굴절율과 j 번째 층에 입사하는 입사각이다.

ϕ_j 는

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

로서 파장 λ 인 광파가 j 번째 층의 기하학적 두께 h_j 를 통과하는 동안 광파의 위상 변화(phase change)이다.

위 (1)식에 포함되어 있는 행렬의 곱의 결과를 다음과 같이 두자.

$$A = \prod_{j=1}^m A_j = \begin{pmatrix} a_{11} & i a_{12} \\ i a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \quad (4)$$

(4)식을 (1)식에 대입하고 $M_{kl}(k, l=1, 2)$ 을 아래와 같이 놓으면,

$$\left. \begin{aligned} M_{11} &= Y_0 a_{11} + Y_{m+1} a_{22} \\ M_{21} &= Y_0 a_{11} - Y_{m+1} a_{22} \\ M_{12} &= a_{21} + Y_0 Y_{m+1} a_{12} \\ M_{22} &= -a_{21} + Y_0 Y_{m+1} a_{12} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

각 편극에 대한 반사율 R_P , R_S 와 투과율 T_P , T_S 는 다음과 같이 주어진다.

$$R_P = \left(\frac{M_{21}^2 + M_{22}^2}{M_{11}^2 + M_{12}^2} \right)_P \quad (6)$$

$$R_S = \left(\frac{M_{21}^2 + M_{22}^2}{M_{11}^2 + M_{12}^2} \right)_S \quad (7)$$

$$T_P = \left[\frac{Y_{m+1}}{Y_0} \left(\frac{4}{M_{11}^2 + M_{12}^2} \right) \right]_P \quad (8)$$

$$T_s = \left[\frac{Y_{m+1}}{Y_0} \left(\frac{4}{M_{11}^2 + M_{12}^2} \right) \right]_s \quad (9)$$

여기서 밑글자 P, S 는 편극 상태를 표시한다. 편광이 되지 않은 광파가 입사할 때 P 편극과 S 편극이 될 확률이 각각 $\frac{1}{2}$ 씩 되므로 이때의 반사율과 투과율은

$$R = \frac{R_P + R_S}{2} \quad (10)$$

$$T = \frac{T_P + T_S}{2} \quad (11)$$

로 된다.

III. 2계 미분 도함수를 이용한 damped least square method

앞 절에서 편극에 대한 반사율과 투과율을 구했다. 이제 우리가 바라는 성능을 갖는 박막계의 merit function m 을 다음과 같이 정의하자.

$$m = \sum_{j=1}^l f_j^2 = F^T F \quad (12)$$

$$f_j = w_j (s_j(X) - s'_j) \quad (13)$$

여기서 l 은 구하고자 하는 파장의 수, w_j 는 가중치, X 는 설계변수, s_j 와 s'_j 는 각 파장에서 구해야 하는 함수(반사율)와 목표값이다. 그리고 대문자는 vector 또는 행렬을, 소문자는 scalar 량을 표시하며 T 는 transpose vector 또는 transpose matrix를 표시한다.

F 를 2계 미분 도함수를 이용하여 선형화하면 수렴 속도가 빠르며 local minimum에 잘 빠지지 않는다.⁽⁹⁾

$$m = F^T F = m_0 + \dot{m}_0 \Delta X + \frac{1}{2} \ddot{m}_0 (\Delta X)^2 \quad (14)$$

여기서 F 의 $X = X_0$ 에서 1차 미분 계수와 2차 미분 계수를 각각 다음과 같이 두자.

$$\dot{F}_0 = G \quad (15)$$

$$\ddot{F}_0 = D \quad (16)$$

따라서

$$\dot{m}_0 = 2\dot{F}_0^T F_0 = 2G^T F_0 \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \ddot{m}_0 &= 2[\ddot{F}_0^T F_0 + \dot{F}_0^T \dot{F}_0] \\ &= 2(D^T F_0 + G^T G) \end{aligned} \quad (18)$$

이므로 merit function은 다음과 같이 주어진다.

$$m = m_0 + 2G^T F_0 \Delta X + (D^T F_0 + G^T G)(\Delta X)^2 \quad (19)$$

최소화 되는 조건은 $\dot{m} = 0$ 이므로

$$G^T F_0 + (D^T F_0 + G^T G) \Delta X = 0 \quad (20)$$

인 normal equation을 얻는다.

계산의 양을 줄이기 위해서 pseudo second derivative method를 이용한 2계미분 도함수를 도입하자. 즉 i 번째 iteration에서 f_i 의 1계 함수도를 $\partial f_i / \partial x_k$ 라고 하면 $(i+1)$ 번째 iteration에서 2계도함수 $\partial^2 f_i / \partial x_k \partial x_k$ 는

$$\frac{\partial^2 f_i^{(i+1)}}{\partial x_k \partial x_k} = \frac{1}{(\Delta x_k)^{(i)}} \left[-\frac{\partial f_i^{(i+1)}}{\partial x_k} - \frac{\partial f_i^{(i)}}{\partial x_k} \right] \quad (21)$$

로 근사된다. pseudo second derivative method는 2계 미분 도함수의 대각요소를 적은 계산으로 구할 수 있으나 (21)식에서 보듯이 Δx_k 가 작아지면 2계 미분 도함수가 커져 큰 damping을 받고 따라서 Δx_k 가 더 작아지므로 damping의 크기를 적당히 조절해 주어야 한다. 그리고 off diagonal element의 영향을 보상하기 위해 (20)식을 damping factor를 고려하여

$$G^T F_0 + (p^2 D^T F_0 + G^T G) \Delta X = 0 \quad (22)$$

인 normal equation으로 사용한다. 여기서 p^2 은 damping factor이다.

IV. 수치 계산

설계 조건은 입사각이 45° 일때 다층 박막계의 성능이 $\lambda_1 = 0.85 \mu\text{m}$ 과 $\lambda_2 = 1.30 \mu\text{m}$ 에서의 반사율과 투과율의 비가 최대 또는 최소가 되게 하는 것이다. 그리고 $\lambda_2 = 1.30 \mu\text{m}$ 대신 $\lambda_2 = 1.50 \mu\text{m}$ 에서도 위와 같은 광학적 성능을 갖도록 하는 것이다.

증착물질로서는 흡수계수를 무시할 수 있는 유전체 MgF_2 와 ZnS 를 사용하고 기판으로는 BK-7 유리를 선택하였다. 이들의 dispersion curve와 물리적 성질이 그림 2,⁽¹²⁾ 그림 3,⁽¹³⁾ 그림 4⁽¹⁴⁾와 표 1⁽¹⁵⁾, 표 2⁽¹⁴⁾에 나타나 있다.

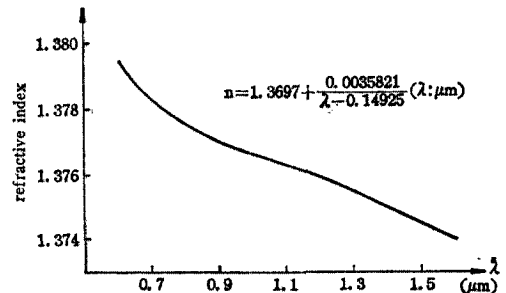


Fig. 2. Refractive index of MgF_2 .

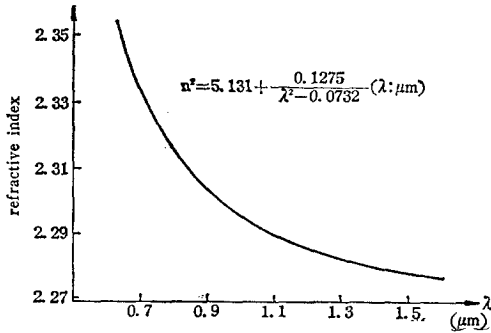


Fig. 3. Refractive index of ZnS

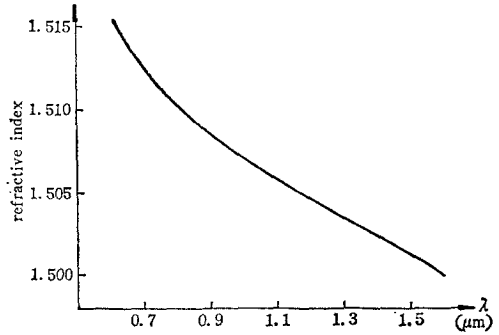


Fig. 4. Refractive index of BK-7 glass.

Table. 1. Physical properties of MgF₂ and ZnS (298°K)

Physical properties	MgF ₂	ZnS
Density (g/cm ³)	3.177	4.09
Melting/Softening temperature (°K)	1,498	1,293
Solubility in water (g/100g H ₂ O)	0.0076(291°K)	6.5×10 ⁻⁵ (299°K)
Young's modulus (psi)	not available	1.65×10 ⁶
Hardness (Mohs)	415(100g)(Knoop)	3.5-4
Linear expansion coeff(K) ⁻¹	4×10 ⁻⁶	6.14×10 ⁻⁶ (273°K)
Thermal conductivity) (10 ⁻⁴ cal/cm. sec. °K)	not available	635
Specific heat (cal/g)/°K	0.284	0.116

Table. 2. Physical properties of BK-7 glass.

Young's modulus (kgW/mm ²)	7,980
Softening temp (°C)	624
Density (g/cm ³)	2.53 (4°C)
Liner expansion coeff (°C) ⁻¹	7.4×10 ⁻⁶ (-30°C~+70°C) 8.6×10 ⁻⁶ (+100°C+300°C)
Hardness (kg/mm ²)	551~650

박막층 수는 15층으로 하였다. (16)

두 광파를 분할하는 dichroic filter는 일반적으로 네칭형인 $(\frac{H}{2}L\frac{H}{2})^n$, 또는 $(\frac{L}{2}H\frac{L}{2})^n$ 과 같은 edge filter를 이용하게 된다. (17,18) 여기서 H와 L을 각각 굴절율이 큰 박막과 작은 박막의 광학적 두께가 $\frac{\lambda_0}{4}$ 인 박막을 표시한다.

본 연구에서는 optical monitoring이 쉽게 행하여지도록 하기 위해, 양쪽 끝박막(m=1, 15; 그림 1 참조)을 matching layer로 보고 가운데 층들은 선택파장의 $\frac{\lambda_0}{4}$ 그리고 matching layer는 $\frac{\lambda_0}{8}$ 의 정

배수가 되는 광학적 두께를 갖도록 하였다. 즉 k와 l이 정수인 조건하에 $(k\frac{H}{2})(LH)^6 L(l\frac{H}{2})$ 또는 $(k\frac{L}{2})(HL)^6 H(l\frac{L}{2})$ 인 형태를 택하였다. k와 l의 변화와 선택파장의 변화에 대하여 (22)식을 이용하여 계산하였다. λ₁에서 적반사율을 λ₂에서 고반사율을 갖도록한 박막계나, $(k\frac{L}{2})(HL)^6 H(l\frac{L}{2})$ 형의 박막계는 두 파장영역 부근에서 spectral performance가 좋지 않았다. (5,17) λ₂가 1.30μm일때 $(\frac{H}{2}L\frac{H}{2})^7$ 형의 박막필터가 λ₂가 1.50μm일때 $\frac{H}{2}$

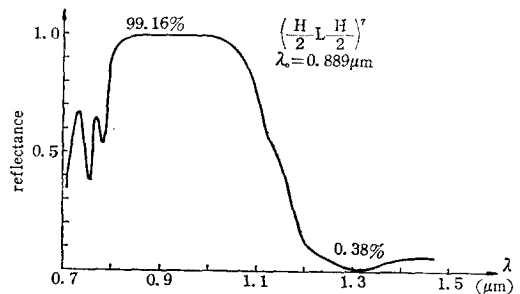


Fig. 5. Calculated reflectance of optimum dichroic filter design.

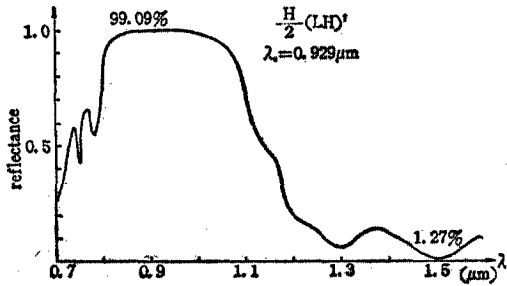


Fig. 6. Calculated reflectance of optimum dichroic filter design.

(LM)⁷ 형의 박막필터가 최적임을 알 수 있었다. 설계된 박막필터의 spectral performance가 그림 5, 그림 6에 나타나 있다. 그림 5에서 보듯이, $(\frac{H}{2}L\frac{H}{2})^7$ 형인 박막필터는 선택파장 0.889 μm 일 때, 0.85 μm 에서 99.16%의 고반사율을 나타내며 1.30 μm 에서 0.38%의 저반사율을 나타내어 두 반사율의 비가 약 300이 됨을 알 수 있다. 이 경우가 운데 13층의 $\frac{\lambda_0}{4}$ 인 박막두께를 갖는 층이 있고 양 쪽 끝에 $\frac{\lambda_0}{8}$ 인 박막두께를 갖는 박막층이 존재함을 알 수 있다. 그림 6은 $\frac{H}{2}(LH)^7$ 형인 박막필터로서 선택파장이 0.929 μm 일 때 0.85 μm 에서 99.09%의 고반사율을 1.50 μm 에서 1.27%의 저반사율을 나타내어 두 반사율의 비가 약 80 이상이 됨을 알 수 있다. 이 경우는 첫번째 층만 제외하고 모두 $\frac{\lambda_0}{4}$ 의 광학적 두께를 갖고 있으므로 optical monitoring을 하기가 쉽다. 다시 말해서 마지막층을 증착할 때만 선택파장을 바꾸어 주기만 하면 된다.⁽¹⁶⁾ 그림 7과 그림 8은 0.85 μm 영역의 반사율을 높이고 1.30 μm 와 1.50 μm 영역의 투과율을 높이기 위해 그리고 각 과장영역을 넓히기 위해 matching layer를 다섯($m=1, 2, 15, 16, 17$; 그림 1 참조)으로 하여 계산한 결과이다. 박막층 수의 갯수는 17로 하였다. 그림 7에서 보듯이 선택파장이 0.700 μm 인 경우 각 층의 phase thickness $(\frac{360^\circ}{\lambda} \times \text{optical thickness})$ 가 $\phi_1 = 47.192^\circ, \phi_2 = 89.443^\circ, \phi_3 = \phi_4 = \dots = \phi_{14} = 90^\circ, \phi_{15} = 90.679^\circ, \phi_{16} = 98.654^\circ, \phi_{17} = 113.637^\circ$ 일 때 반사율이 99% 이상인 영역이 0.76~0.92 μm , 1% 이하인 영역이 1.18~1.40 μm 임을 알 수 있다. 그림 8은 선택파장 0.800 μm 인 경우 $\phi_1 = 43.983^\circ, \phi_2 = 83.899^\circ, \phi_3 = \phi_4 = \dots = \phi_{14} = 90^\circ, \phi_{15} = 86.645^\circ, \phi_{16} = 93.228^\circ, \phi_{17} = 105.529^\circ$ 일 때 반사

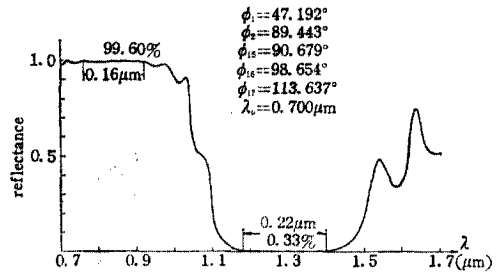


Fig. 7. Calculated reflectance of optimum dichroic filter design.

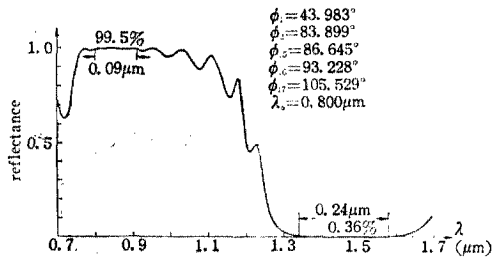
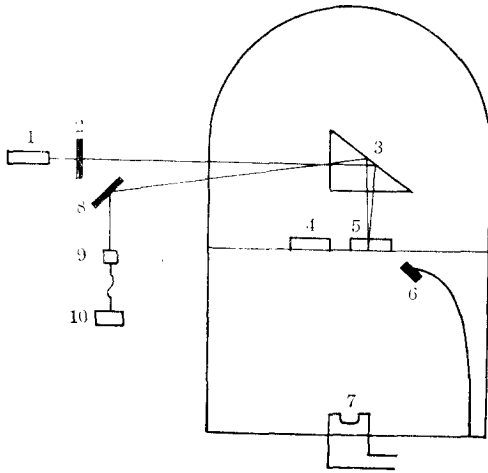


Fig. 8. Calculated reflectance of optimum dichroic filter design.

율이 99% 이상인 영역이 0.80~0.91 μm , 1% 이하인 영역이 1.34~1.58 μm 임을 알 수 있다. 계산과 정에서 target의 수는 λ_1 과 λ_2 의 차 영역에서 각각 5개씩, 0.01 μm step과 0.02 μm step으로 target을 계산 과정에서 바꾸어가며 계산했다. damping factor가 10^{-2} order일 때 잘 수렴하였다.

V. 실험 결과 및 논의

진공증착을 위한 실험장치가 그림 9에 그려져 있다. monochromator에서 나온 광파가 chopping되어, chamber 속에 장전되어 있는 기판을 통과 박막에서 반사된 후 photo detector에서 intensity가 측정되게 하였다. 이 intensity는 oscilloscope와 chart recorder에 연결하여 측정하였다. 그림 5에 의한 data를 이용하여 증착한 경우에는 $\frac{\lambda_0}{8}, \frac{\lambda_0}{4}$ 되는 즉 λ_0 를 $2\lambda_0$ 가 되는 파장으로 하여 $(H' 2L' H')^7$ 형으로 optical monitoring을 하면서 quartz oscillator로써 이들의 상대적인 값들을 비교함으로써 보완하였다. 굴절률에 dispersion이 존재하므로 $\lambda_0 = 2\lambda_0$ 가 꼭 되는 것이 아니므로 실험하는 과정에



- 1. monochromator
- 2. chopper
- 3. prism
- 4. substrate
- 5. monitoring plate
- 6. quartz oscillator
- 7. evaporation source
- 8. mirror
- 9. photo detector
- 10. chart recorder

Fig. 9. Alignment of the thickness monitoring system for thin films under vacuum deposition.

서 선택파장의 변화를 고려해 주어야 한다.⁽¹⁶⁾

그림 6에 의한 data를 이용하여 증착할 경우 맨 바깥층만 제외하고 모두 optical thickness가 $\frac{\lambda_0}{4}$ 이므로 위의 경우보다 다소 쉽게 증착할 수 있으나 맨 마지막 층을 증착할 경우는 위와 같은 점을 고려하여야 한다.

이와 같이하여 증착된 기판의 다른면에 double layer 무반사 박막을^(5,17,18) 증착한 후 spectrophotometer, spectral performance를 측정 한 것이 그림 10과 그림 11에 나타나 있다.

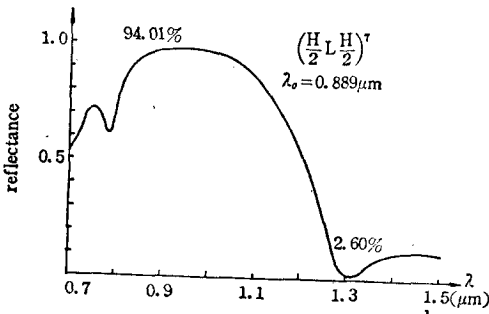


Fig. 10. Experimental reflectance for the data of Fig. 5.

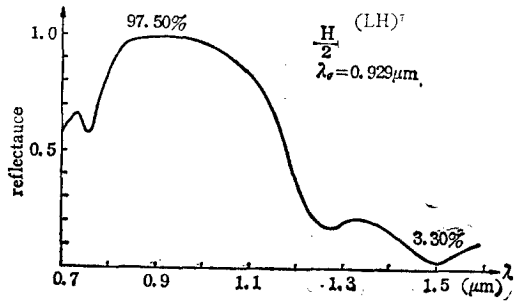


Fig. 11. Experimental reflectance for the data of Fig. 6.

그림 10에서 보듯이 $(\frac{H}{2}L\frac{H}{2})^7$ 형의 경우 선택파장이 $\lambda_0=0.889\mu\text{m}$ 일때의 실험치는 $0.85\mu\text{m}$ 에서 94.10%, $1.30\mu\text{m}$ 에서 2.60%의 반사율을 갖는다. 즉 반사율의 비는 34.5가 되며 각 파장에서 반사율과 투과율의 비는 각각 17.0, (37.5)⁻¹이다. 그리고 그림 11에서 보듯이 $\frac{H}{2}(LH)^7$ 형의 경우 선택파장이 $\lambda_0=0.929\mu\text{m}$ 일 때의 실험치는 $0.85\mu\text{m}$ 에서 97.0%, $1.50\mu\text{m}$ 에서 3.30%의 반사율을 갖는다 이 경우 반사율의 비가 26.5가 되며, 각 파장에서 반사율과 투과율은 비는 각각 39.0, (29.2)⁻¹이다. 이와 같은 성능을 갖는 박막체는 평통진용 WDM (Wavelength Division Multiplexer)에 사용할 수 있다. 그리고 monitoring plate를 여러개 사용할 수 있는 더 잘 준비된 진공증착기를 사용하여 그림 7과 그림 8에 나타난 data에 따라 진공증착된 경우 중심파장이 넓은 평통한 박막체를 얻을 수 있을 것으로 생각된다. 따라서 turnable semiconductor laser에 대하여도 사용할 수 있을 것이다.

Ⅶ. 결 론

단일 광섬유로 두 파장의 신호를 동시에 전송할 때 필수적으로 필요한 광파장($0.85\mu\text{m}$ 과 $1.30\mu\text{m}$ 또는 $0.85\mu\text{m}$ 과 $1.50\mu\text{m}$)분할 다중박막체를 설계 제작하였다. 입사각을 45°, 박막층 수를 15층으로 하였을 경우 처음과 마지막층을 선택파장의 $\frac{\lambda_0}{8}$ 가 되고 나머지 층은 $\frac{\lambda_0}{4}$ 가 되는 박막 두께를 갖는 $(\frac{H}{2}L\frac{H}{2})^7$ 형은 중심파장이 $0.889\mu\text{m}$ 일때 설계치가 $0.85\mu\text{m}$ 에서 99.16%, $1.30\mu\text{m}$ 에서 0.38%의 반사율을 나타내었으며 이것을 이용하여 진공증착된 박막필터는 $0.85\mu\text{m}$ 에서 94.01%, $1.30\mu\text{m}$ 에서 2.60

%의 반사율을 갖는 성능을 나타내었다. 그리고 $\frac{H}{2}(LH)^7$ 형은 중심파장이 $0.929\mu\text{m}$ 인 경우 설계치가 $0.85\mu\text{m}$ 에서 99.09%, $1.50\mu\text{m}$ 에서 1.27% 반사율을 나타내었고, 이것을 이용하여 진공증착된 박막필터는 $0.85\mu\text{m}$ 에서 97.5%, $1.50\mu\text{m}$ 에서 3.30%의 반사율을 갖는 성능을 나타내었다. 이들 data는 WDM용 광분할 박막필터로 사용될 수 있을 것이다. 그리고 각 중심파장을 넓히기 위해 matching layer를 5개 고려한 17층으로 이루어진 박막계를 설계하여 박사율이 99% 이상이 $0.76\mu\text{m}\sim 0.92\mu\text{m}$ 영역에서, 1% 이하가 $1.18\sim 1.40\mu\text{m}$ 인 영역에서 존재하는 박막계와 반사율이 99% 이상이 $0.80\mu\text{m}\sim 0.91\mu\text{m}$ 영역에서 1% 이하가 $1.34\mu\text{m}\sim 1.58\mu\text{m}$ 영역에서 존재하는 박막계를 설계하였다. 이들 data는 turnable semiconductor laser를 이용한 system에 이용할 수 있을 것이다.

감사의 말

본 연구 수행을 위해 1984년도 학술연구조성비를 지원해 준 문교부에 감사사를 드리며, 특히 많은 도움을 준 한국과학기술원의 김석원씨에게 감사의 뜻을 표합니다. 그리고 본 논문중의 그림들을 정리하여 주신 박영수씨에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. W. J. Tomlinson, Appl. Opt. **16**, 2180(1977).
2. H. F. Mahlein, Optica Acta, **28**, 29(1981).
3. T. Tanaka, S. Kishi and T. Tsutsumi, Appl. Opt. **21**, 3423 (1982).
4. H. F. Mahlein, Fiber Integr. Opt. **4**, 339

- (1983).
5. 김석원, 석사학위 청구논문, 한국과학기술원 (1984).
6. H. M. Liddell, *Computer-aided Techniques for the Design of Multilayer Filters* (Adam Hilger, Bristol, 1981), Chapt. 1.
7. J. A. Dobrowolski, Appl. Opt. **4**, 937(1965).
8. A. L. Bloom, Appl. Opt. **20**, 67(1981).
9. 이종용, 석사학위 청구논문, 한국과학기술원 (1985).
10. A. Thelen, "Physics of Thin Film," Vol. 5, Academic Press, N. Y. (1969).
11. 한성홍, 이상수, 새물리(한국물리학회지), **23**, 155(1983).
12. T. M. Bieniewski and S. J. Czyzak, J. Opt. Soc. Am. **53**, 496(1963).
13. "Coating Materials," Balzers Catalogue (1981).
14. "Ohara Optical Glass" Catalogue.
15. A. J. Moses, "Optical Materials Properties," Hand Book of Electronic Materials Vol. 1, IFI/PLENUM, N. Y. (1971).
16. 아래 참고문헌을 수행하는 동안 사용한 진공증착기의 성능이 대체로 박막층수가 15~16 층에서 진공증착된 박막이 안정되었으나 17층 이상에서 가끔 flake off 현상이 발생하였다.
김석원, 박정현, 한성홍, 공홍진, 이상수, 새물리, **25**, 193(1985).
17. 김석원, 한성홍, 이상수, 새물리, **25**, 78(1985).
18. H. A. Macleod, *Thin Film Optical Filters* (American Elsevier, N. Y. 1969).