

온도변화에 따른 간섭필터의 중심파장 이동의 전산모의

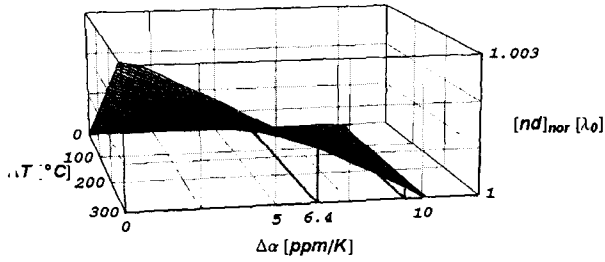
Simulation for the center-wavelength shift of interference filters by temperature variation

김성화*, 황보창권

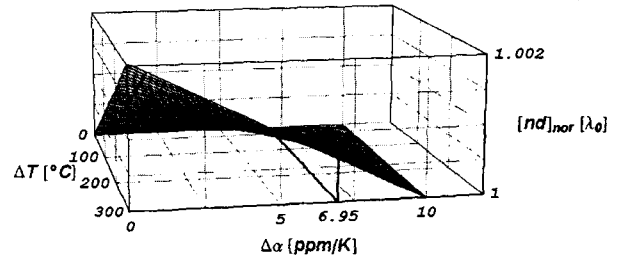
인하대학교 물리학과, hwangbo@inha.ac.kr

DWDM 필터와 같은 간섭필터는 밴드폭이 좁아지고 투과파장에 해당하는 채널의 수가 증가함에 따라 투과파장의 외부환경에 대한 안정성이 중요하다. 기존의 전자빔 증착법으로 증착된 유전체 다층박막은 일반적으로 미세기둥구조로 인해 낮은 조밀도를 가지기 때문에 외부의 습도나 온도 변화 등에 민감하다. 낮은 조밀도의 유전체 다층박막을 대기 중에 노출되었을 때, 대기 중의 습기가 기둥과 기둥 사이로 침투되어 유효굴절률의 증가로 인하여 박막의 광학두께가 증가하게 되고 결국 스펙트럼이 장파장으로 이동하게 된다⁽¹⁾. 이러한 박막의 낮은 조밀도는 이온보조증착(IAD), 이온빔 스퍼터링(IFS), 플라즈마 이온보조증착(PIAD)과 같은 높은 에너지를 갖는 이온들을 이용하여 향상시킬 수 있으며, 외부 습도에 의한 투과파장의 이동을 방지할 수 있다. 최근에는 조밀도가 1에 가깝게 제작된 다층박막의 온도 안정성에 대한 연구가 진행되고 있다^(2,3). 온도가 증가할 경우, 박막 물질과 기판의 열적 변형과 기판의 응력으로 인해 필터 스펙트럼이 이동하게 된다. H. Takashashi는 단일 공동 간섭필터에 대해서 유효굴절률을 갖는 단일층으로 대체하여 온도증가에 따른 단일층의 조밀도, 유효굴절률, 그리고 두께 변화를 elasticity 방정식으로부터 얻었으며, 이를 기반으로 간섭필터의 열적 안정성에 대해서 설명하였다. 또한 서로 다른 열팽창계수를 갖는 기판들에 증착된 간섭필터의 중심파장 이동을 실험적으로 측정하여 제시한 이론과 비교하였다⁽²⁾. 이 저자에 의하면, 온도 안정성이 좋은 간섭필터를 만들기 위해서는 10~11 ppm/K의 열팽창계수를 가지는 기판을 추천하고 있다. 본 발표에서는 간섭필터에 대해서 H. Takashashi의 모델을 이용하여 각각의 층들에 적용하였다. 상온 T_0 에서 T 로 온도를 증가시켰을 때, 온도변화($\Delta T = T - T_0$)에 의한 각각의 박막의 조밀도, 굴절률, 그리고 두께 변화를 수식으로 전개하였고, 이 값들로부터 간섭필터를 설계하여 중심파장 이동을 알아보았다. 전산모의에 적용한 박막은 Ta_2O_5 ($n_f=2.1$)와 SiO_2 ($n_f=1.44$)이고, 기판은 열팽창계수가 다른 BK7 ($n_s=1.5$)과 WMS-02 ($n_s=1.66$)이다. 편의상 상온(T_0)에서 박막의 조밀도는 1.0으로 하였다.

박막의 조밀도는 온도가 증가함에 따라 열팽창계수 차이($\Delta a = a_s - a_f$)가 0보다 작으면 증가하고 0보다 크면 감소한다. 그러므로, BK7과 WMS-02에 증착된 Ta_2O_5 와 SiO_2 박막은 모두 조밀도가 감소한다. 박막의 굴절률은 기판에 따라 다른 경향을 보인다. 온도가 증가할 때, Ta_2O_5 박막의 굴절률 n_f 는 열팽창계수의 차이가 $\Delta a=9.1$ 을 경계로 이 값보다 작을 경우는 증가하고 이 값보다 클 경우는 감소한다. 즉, BK7 기판($\Delta a=6.4$) 위의 Ta_2O_5 박막 굴절률은 증가하고 WMS-02 기판($\Delta a=9.4$) 위의 박막 굴절률이 감소한다. 반면에 SiO_2 박막의 경우는 $\Delta a=10.8$ 을 경계로 증감이 교차하고, 두 기판($\Delta a=6.95, 9.95$)에 대해서 박막의 굴절률이 모두 증가한다. 한편 Ta_2O_5 박막의 두께는 Poisson 비율이 0이기 때문에 열팽창계수의 차이에 관계없이 온도가 증가함에 따라 증가한다. 그러나 SiO_2 박막의 두께는 $\Delta a=5.2$ 를 경계로 증감이 교차하며, 두 기판에 대해서 모두 감소한다. 간섭필터의 중심파장 이동은 박막의 광학두께 변



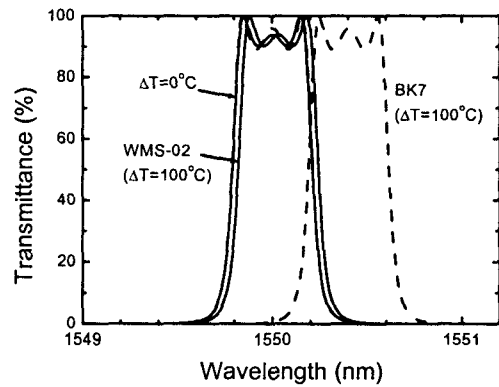
(a) Ta₂O₅ 박막



(b) SiO₂ 박막

[그림 1] 온도변화(ΔT)와 열팽창계수 차이($\Delta\alpha$)의 함수에 대한 박막의 규격화된 광학두께(nd) 변화.

화과 관계된다. 그림 1은 온도변화(ΔT)와 기판-박막 열 팽창계수 차이($\Delta\alpha = \alpha_s - \alpha_f$)에 대한 T_0 일 때 박막의 광학두께로 규격화된 광학두께($[nd]_{nor}$) 변화를 보여주고 있다. 그림 1(a)는 Ta₂O₅ 박막의 경우이고, (b)는 SiO₂ 박막의 경우이다. 그림에서 ΔT - $\Delta\alpha$ 평면($[nd]_{nor} = 1$)에 있는 두 실선은 각각 BK7과 WMS-02 기판에 대한 $\Delta\alpha$ 를 나타낸다. 동일한 온도변화에 대해서 Ta₂O₅ 와 SiO₂ 박막들의 광학두께 변화는 WMS-02 기판이 BK7 기판보다 훨씬 작다. 특히, WMS-02 기판에서 SiO₂ 박막의 광학두께는 반대로 약간 감소한다. WMS-02 기판에서 광학두께 변화가 작다는 것은 간섭필터의 중심파장 이동이 작다는 것을 의미하며 그 결과를 그림 2에서 보여주고 있다. 그림 2는 온도 변화 $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ 일 때, BK7과 WMS-02 기판에 제작된 3 cavity 구조를 갖는 Fabry-Perot 간섭필터들의 중심파장이 장파장으로 이동하였음을 보여주고 있다. BK7 기판의 경우 중심파장 약 4 pm/°C만큼 이동한 반면, WMS-02 기판의 경우는 0.3 pm/°C의 중심파장 이동을 가졌다. 또한 H. Takashashi의 실험적 결과와 비교하여, 아주 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다.



[그림 2] 온도변화에 따른 3-cavity 간섭필터의 중심파장의 이동.

[공기] $C L C L C$ [기판],
 $C = (HL)^8 H \quad 4L \quad H(LH)^8$, $H = 2.10$ (Ta₂O₅), $L = 1.44$ (SiO₂), 기판 = 1.50 (BK7), 1.66 (WMS-02),
 $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$.

참고문헌

1. 황보창권, "박막광학", 다성출판사, 서울, pp. 189-192, 2001.
2. H. Takashashi, "Temperature stability of thin-film narrow-bandpass filters produced by ion-assisted deposition," Applied Optics, 34(4), 667-675 (1995).
3. H. Hagedorn, A. Lotz, P. Pecher, and O. Treichel, "Ultra Narrow Band Pass Filters Produced by Plasma Ion Assisted Deposition," the Proceedings of the 8th Topical Meeting on Optical Interference Coatings, Banff, Alberta, Canada, July 15-20, 2001.