

# 광통신용 광학 박막의 최신 기술 동향

광통신 기술의 발달에 따라 광학 박막을 이용한 광학 소자가 많이 사용되고 있으며, 다양하고 정교한 광학소자로서 광학박막이 계속 많이 사용될 것으로 기대되고 있다. 광통신 광학박막, 파장 다중 분할 필터(WDM), 이득 평탄 필터, 파장 가변 패브리-페로 필터, 증착 방법을 소개한다.

✦ 글 : 황보창권 교수/인하대학교(hwangbo@inha.ac.kr)

급격히 증가하는 대량의 전화 정보를 전송하기 위해 정보 전달의 매개체가 전자인 구리 전선을 매개체가 빛인 광섬유로 대체한 광통신 시스템이 구축되어 사용 중에 있다. 최근 광통신 시스템에서는 각종 전기적 소자를 광전(electro-optic) 소자로 대체하고 있으며, 더 나아가 초고속으로 대용량 정보를 전달하기 위해서 광전 소자를 순수하게 빛만을 전달 매개체로 사용하는 순수 광학(all-optical) 소자로 전환하고 있다. 따라서 빛만을 사용하는 광통신 시스템에서는 다양한 종류의 광학 소자가 필요하게 되었으며, 광통신 기술의 발달에 따라 광학 박막을 이용한 광학 소자가 이 분야에서 많이 사용되고 있다. 광학 박막은 설계 방법이 이미 확립되어 있고, 제작 방법이 비교적 용이하고 널리 알려져 있으며, 외부 환경에 강한 박막을 제작할 수 있는 기술이 개발됨에 따라 광통신 분야에서의 응용이 더욱 증가할 것으로 기대된다.

## 1. 광통신 광학박막

광섬유를 통하여 디지털로 전달하는 0과 1의 기본 정보 단위는 비트(bit)로 표현하며, 정보의 용량은 초당 비트의 수로 나타내며 단위는

bit/s, b/s, bs 등으로 표시한다. 전통적인 목소리 신호와 함께 최근의 비디오 정보, 인터넷, 멀티미디어, 고속통신, 무선통신 등에서 시급하게 요구하는 많은 양의 정보를 빠르게 전달하기 위해서는 비트의 수를 급격히 증가시켜야 하며, 이를 단위가 Hz인 진동수로 나타내면 밴드폭(bandwidth)을 높여야 한다.

그림 1과 같은 간단한 광통신 시스템의 구성에서 한 개의 광섬유에 한 개의 파장을 사용하여 전달하는 정보가 10 Gb/s ( $10 \times 10^9$  b/s)라 하자. 만약 40개의 파장을 한 개의 광섬유를 통하여 보내면 400 Gb/s의 대용량 정보를 전달할 수 있으며, 밴드폭은 파장 수만큼 넓어진다. 이와 같이 한 개의 광섬유에 여러 개의 파장을 사용하여 대용량의 정보를 전달하는 기술을 파장 다중 분할(wavelength division multiplexing, WDM) 전송 기술이라 한다.

WDM 전송 기술에서는 한 파장은 목소리 정보, 다른 파장은 비디오 정보, 또 다른 파장은 인터넷 정보 등으로 각 파장이 다른 정보를 전달할 수 있다. 즉 각 파장이 독립적인 채널(channel)로서 다른 정보를 전달하므로 초고속 대용량 정보를 전달하기에 적합하다. 특히 WDM 기술에

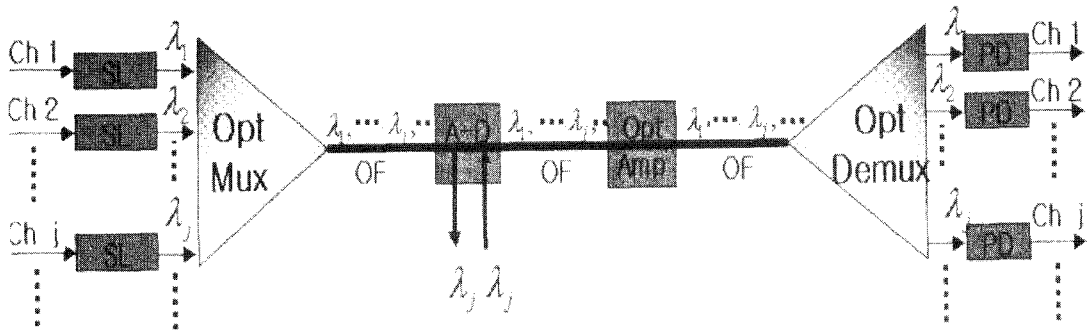


그림 1. 간단한 광통신 구성도. SL=반도체 레이저(semiconductor laser), Opt Mux=파장 다중 합치기(optical multiplexer), OF=광섬유(optical fiber), A-D = 추가-탈락(add-drop) 필터, Opt Amp = 광증폭기(optical amplifier), Opt Demux = 파장 다중 분할기(optical demultiplexer), PD = 광검출기(photodetector).

서 파장의 수가 많아 파장 사이의 간격이 좁으면 조밀 파장 다중 분할(dense wavelength division multiplexing, DWDM)이라 하고, 파장의 수가 10개 이하로 작고 간격이 넓으면 드문 파장 다중 분할(coarse WDM, CWDM)이라 한다. 일반적으로 WDM과 DWDM은 특별히 구분하지 않고 같은 의미로 사용한다. DWDM에서는 여러 개의 파장을 합치고(multiplex) 분리시키는(demultiplex) 기능이 필요하며, 이를 광학박막으로 수행할 경우 패브리-페로형의 좁은 대역 투과 필터와 넓은 대역 투과 필터를 사용한다.

광통신에서 광원으로 사용하는 반도체 레이저의 파장 영역은 광섬유의 최소 손실 영역인 1310nm와 1550nm이며, 최근 장거리 전송이 요구됨에 따라 1550nm 파장 영역을 많이 사용하고 있다. 반도체 레이저에는 무반사 코팅이 많이 사용되며, 12장에서 반도체 레이저의 출력 향상을 위하여 출력 단면에는 무반사 코팅을 하고 반대 면에는 고반사 코팅을 할 수 있다는 것을 보았다. 특히 반도체 광변조기에서는 양 단면의 무반사 코팅이 빛의 손실을 줄이기 위하여 중요하다.

장거리 전송 광통신에서는 광섬유의 중간에서

선택적으로 특정 파장을 빼내고 다시 넣는 광학적 추가-탈락(add-drop) 필터를 사용한다. 즉 한 파장에 들어 있는 정보를 전송 중간에 탈락시켜 사용하고, 같은 파장에 다른 정보를 넣어 광섬유에 추가시키는 필터이다. 전송 중 파장이 다른 여러 개의 추가-탈락 필터를 넣을 수 있다. 추가-탈락 필터로는 좁은 대역 투과 필터나 광속 분리를 사용할 수 있다.

광섬유에서 사용하는 파장이 빛의 손실이 작은 영역이지만, 수 십 km를 진행하면 손실이 커지게 되어 광신호를 증폭시켜 주어야 한다. 광증폭기로는 어븀 첨가 광섬유 증폭기(erbium-doped fiber amplifier, EDFA)와 반도체 광증폭기(semiconductor optical amplifier)를 많이 사용한다. EDFA는 파장마다 증폭시켜 주는 이득이 다르므로 특정 파장이 다른 파장보다 증폭이 많이 될 수 있으며, 강해진 빛의 세기는 광섬유에서 비선형 효과를 유도하여 신호를 왜곡시킬 수 있다. 따라서 EDFA에서 증폭된 파장 중 이득이 높은 파장의 투과율은 감소시키고, 이득이 낮은 파장은 그대로 투과시키는 필터, 즉 증폭된 광신호의 세기를 모든 파장에 대해 같게 해주는 필터가 필요하며, 이를 이득 평탄 필터

(gain flattening filter)라 한다. 이다. 한편 반도체 광증폭기의 양면에는 반사율이 매우 작은 무반사 코팅을 하여 반사 손실을 감소시켜야 한다.

이 외에도 능동형 파장 가변 필터, 장파장 투과 필터, 단파장 투과 필터, 파장 잠금 필터(locker) 등이 사용되고 있으며, 새로운 광학 박막의 요구는 계속 증가할 것이다.

광학 박막에서의 투과율을  $T$ 라 할 때 광통신에서는  $10\log_{10}T$ 를 많이 사용하며 단위는 dB(decibel, 데시벨)로 나타낸다. 표1에 많이 사용하는  $10\log_{10}T$ 와  $T$ 사이의 관계를 표시하였다. 또한 박막을 투과하지 않은 빛은 손실이며, 특히 간섭 필터의 투과 대역에서는 이를 삽입 손실(insertion loss)이라 한다. 삽입 손실은  $10\log_{10}(1/T)$ 로 나타내며, 삽입손실이 0.3 dB 이하이면 투과 대역의 투과율이 0.933 이상이다.

**2 파장 다중 분할(WDM) 필터**

DWDM 광통신에서는 대용량의 정보를 장거리 전송하는 방법으로 그림 1과 같이 각 채널에 대응되는 반도체 레이저에서 나오는 파장들을 한 개의 단일 모드 광섬유에 넣는 파장 다중 합

표 1.  $10\log_{10}T$ 와  $T$

$10 \log_{10} T$ (dB)	$T$
0	1
-0.1	0.977
-0.3	0.933
-0.5	0.891
-1	0.794
-3	0.501
-10	0.1
-20	0.01
-30	0.001

치기(multiplexer)와 여러 개의 파장으로 정보를 전달받은 광섬유 끝에서 이 파장들을 분리하여 각각 다른 광검출기로 보내는 파장 다중 분할기(demultiplexer)를 사용하고 있다. 파장 다중 합치기와 파장 다중 분할기는 역할은 다르나 특성이 같으므로 구분하지 않고 파장 다중 분할(WDM) 필터라 부른다.

DWDM 광통신에서는 각 파장이 채널에 해당되므로 채널의 수, 채널의 중심 파장, 채널의 대역폭, 채널 사이의 간격 등이 중요한 변수이다. DWDM에서 사용할 수 있는 파장은 광증폭기로 빛을 증폭하는 경우 증폭기의 파장 영역 안에 있어야 한다. 1550 nm 근처에서는 EDFA의 증폭 영역인 C-대역의 1528~1561 nm와 L-대역인 1561~1620 nm를 사용할 수 있다. 광통신에서는 파장과 함께 진동수를 많이 사용하며, 파장의 반치폭과 진동수의 반치폭은  $\Delta\lambda = \frac{c}{\nu^2} \Delta\nu$ 로 주어진다. 파장  $\lambda=1550$  nm는  $\nu=193.41$ THz이고, 진동수의 반치폭이  $\Delta\nu=200$ GHz이면 파장의 반치폭은  $\Delta\lambda=1.6$ nm이다.

C-대역 DWDM에서 사용하는 채널의 기준 진동수는 193.1 THz이고 파장은 1553.60nm이다. 만약 채널 사이의 간격이  $\Delta\nu$ 이면 각 채널의 진동수는  $\nu_{\pm j}=193.1 \pm j \Delta\nu$  THz에 의해 결정될 수 있으며,  $j = 0, 1, 2, \dots$ 이다. 예를 들면  $\Delta\nu=50$  GHz ( $\Delta\lambda=0.4$  nm)이면, 각 채널의 진동수는  $\nu=\dots 193.0, 193.05, 193.1, 193.15, 193.20, \dots$ THz가 되고, 파장은  $\lambda=\dots, 1553.33, 1552.93, 1552.52, 1552.12, 1551.72, \dots$  nm가 되며, 최대와 최소의 제한은 없다. 간단한 드문 파장 다중 분할기(CWDM)로는 지역네트워크와 광증계기 등에서 사용하는 쌍방향 1310/1550 nm 파장 다중 분할기, 어븀

광증폭기의 광펌핑에 사용되는 980/1550 nm, 1480/1550 nm 파장 다중 분할기, 네트워크 모니터링에 사용하는 1550/1620 nm 파장 다중 분할기가 있다. 주로 장파장 투과 필터를 파장 다중 분할기로 사용하며 특성 향상을 위해 단파장 투과 필터를 함께 사용하기도 한다.

(1) 좁은 대역 투과 필터

투과 파장이 다른 여러 개의 간섭 필터로 조립되어 있는 광학 박막 DWDM 필터의 기본 원리는 그림 2를 이용하여 설명할 수 있다. 광섬유를 통하여 전달된  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \dots$ 의 여러 파장이 DWDM 필터에 입사하면 투과 파장이  $\lambda_1$ 인 간섭 필터는  $\lambda_1$ 만 채널 1로 투과시키고 다른 파장들은 모두 반사시킨다. 투과 파장이  $\lambda_2$ 인 간섭 필터는 반사된 빛  $\lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \dots$ 중  $\lambda_2$ 만 채널 2로 투과시킨다. 같은 방법으로 각 간섭 필터는 각각의 투과 파장에 해당되는 파장만을 분리하여 각 채널의 광검출기로 보낸다.

가변 파장 영역이 넓은 EDFA를 사용할 경우 DWDM 필터의 파장 간격이 좁으면 채널 수를 쉽게 증가시킬 수 있다. 각 채널과 채널의 중심 진동수(파장) 사이의 간격은 200GHz(1.6 nm), 100GHz(0.8 nm), 50GHz(0.4 nm) 등으로 점점 좁아지고 있으며, 채널 수는 8, 16,

32, ...등으로 증가하고 있다. 채널 수가 증가할수록 투과 대역에서 빛의 삽입 손실과 채널 사이의 교차 대화가 작아야 하고, 온도 변화와 편광에 대한 안정성이 높아야 한다.

그림 3과 같이 채널 폭은 중심 파장(진동수) 주위의 투과 파장(진동수) 대역으로 -0.5 dB( $T=0.891$ )에서의 투과 대역폭이다. 채널 폭은 옆 채널과 교차하지 않는 한 가능한 넓어야 하며, 투과 대역의 모양은 이상적으로 직사각형이어야 한다. 그러나 패브리-페로 단일 공동기 필터의 투과 스펙트럼의 모양은 그림 5.3과 같이 높은 투과율(예를 들면  $T > 0.9$ )의 투과 대역이 좁고 낮은 투과율( $T < 0.1$ )의 대역폭이 넓은 삼각형이며, 공동의 수가 증가하더라도 그림 5.5와 같이 완전한 직사각형이 되지 않는다. 낮은 투과율이라도 이것이 옆 채널로 들어가면 광 전송에서 잡음의 원인이 되며 전체 시스템의 성능을 떨어뜨릴 수 있다. 한 채널의 파장이 옆 채널로 들어가는 정도를 격리(isolation)라 하며, 특히 -25 dB에서 옆 채널과 교차대화되는 투과율을 격리로 표시할 수 있다.

투과 대역의 모양이 직사각형에 가까운 정도를 나타내는 감도지수(figure of merit, FOM)를 -0.5 dB에서의 대역폭과 -25 dB에서의 대역폭(bandwidth, BW)의 비로서  $FOM =$

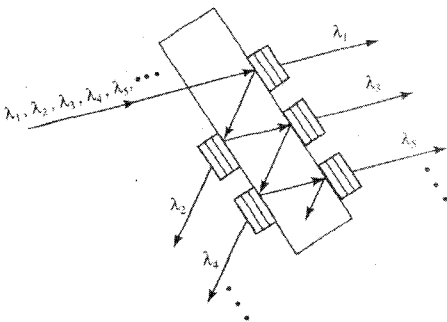


그림 2. 유전체 다층 박막을 이용한 DWDM 필터.

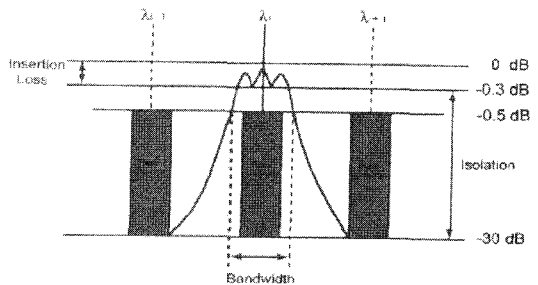


그림 3. DWDM 간섭 필터에서 채널의 중심 파장, 채널 간격, 삽입 손실과 격리

$\frac{BW_{-25dB}}{BW_{-0.5dB}}$  과 같이 정의하자. FOM=1이면 완전한 직사각형의 필터이다.

투과 대역폭이 좁고 흡수가 작은 DWDM 필터는 유전체 거울 패브리-페로 필터(5장 1절 참조)를 이용하며, 공동(간격층)이 여러 개 들어 있는 다중 공동 간섭 필터를 많이 사용한다. 패브리-페로 간섭 필터의 투과 파장은 공동의 두께, 차수, 반사 거울의 반사 위상 등에 의해 결정되며, 투과 대역폭은 거울의 반사율과 차수가 높을수록 감소한다. 최대 투과율은 공동의 흡수와 반사 거울의 흡수가 클수록 감소한다. 설계 방법을 보여 주는 한 예로써 중심 파장이 1550 nm 일 때 채널 간격이  $\Delta\nu=50$  GHz ( $\Delta\lambda$  0.4 nm) 인 DWDM 필터를 다중 공동 간섭 필터와 등가 박막을 이용하여 설계하도록 하자. 50 GHz DWDM 필터의 규격은 삽입 손실이 0.3 dB 이하이고, 투과 대역폭이 -0.5 dB에서 0.2 nm 이상이며 -25 dB에서 0.6 nm 이하이다.

다중 공동 필터 방법

투과 대역폭은 거울의 반사율, 공동(간격층)의 차수와 공동의 개수에 의해 결정되므로 이들을 적절하게 변화시켜야 한다. 채널 간격과 투과 대역폭이 매우 좁으므로 거울은 (LH)가 8번 이상 반복되는 높은 반사율이어야 한다. 고굴절률 간격층(HH)의 투과 대역폭은 저굴절률 간격층(LL)보다 좁다. 일반적으로 고굴절률 박막은 흡수가 작고 저굴절률 박막은 흡수가 없다. 간격층의 흡수는 최대 투과율의 감소를 초래하고 박막이 다결정구조이면 낱알 경계(grain boundary)에서 산란이 생긴다. 간격층(LL)은 흡수가 없고 비정질인 SiO<sub>2</sub>(n=1.444, 1550nm)를 사용하고, 고굴절률 박막(H)은 비정질의 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(n=2.100, 1550 nm)를 사용한다. 공동

은 3개 이상이 되어야 규격을 만족하는 적절한 투과 대역폭을 만들 수 있다.

3중 공동 필터의 반사 거울은 (LH)가 9번 이상 되어야 한다. 간격층의 차수가 1이면 투과 대역폭이 너무 좁으며, 간격층의 차수가 2나 3이 되어야 -0.5 dB에서의 투과 대역폭을 0.2 nm 근처에 맞출 수 있다. 따라서 3중 공동 간섭 필터로 114층으로

$$[\text{공기} | L(LH)^9 4L (HL)^9 H (LH)^9 6L (HL)^9 H (LH)^9 4L (HL)^9 | \text{유리}] \quad (1)$$

$$[\text{공기} | L(LH)^9 6L (HL)^9 H (LH)^9 6L (HL)^9 H (LH)^9 6L (HL)^9 | \text{유리}] \quad (2)$$

와 같은 두 설계가 가능하다. 패브리-페로 필터 사이의 연결층은 H 를 사용하였으며, 공기 옆의 L은 공기와 유리와의 반사율을 줄이기 위한 무반사층으로 투과 대역의 잔물결을 감소시켜 투과율을 증가시킨다. 그림 13.4에서와 같이 두 설계는 투과 대역폭에서의 삽입 손실이 0.1 dB 이하로 매우 작고, -0.5 dB에서의 투과 대역폭이 0.18 nm로 규격보다 약간 작으며, -25 dB에서의 투과 대역폭은 0.6 nm보다 작다. 투과 대역의 FOM은 표 13.2에서 각각 0.30과 0.33 이고 모양이 삼각형에 가깝다.

4중 공동 간섭 필터는 각각 143층과 151층으로

$$[\text{공기} | L(LH)^8 2L(HL)^8 H (LH)^9 4L (HL)^9 H (LH)^9 4L (HL)^9 H (LH)^8 2L (HL)^8 | \text{유리}] \quad (3)$$

$$[\text{공기} | L(LH)^9 2L(HL)^9 H(LH)^9 6L(HL)^9 H (LH)^9 6L (HL)^9 H(LH)^9 2L (HL)^9 | \text{유리}] \quad (4)$$

과 같은 두 설계가 가능하다. 공동의 개수와 차수가 증가하여, 그림 5에서와 같이 -0.5 dB에서의 투과 대역폭이 각각 0.23 nm와 0.22 nm로 3중 공동 필터보다 넓어졌으며, 삽입 손실은 각각 0.2 dB, 0.1 dB 이하이다. 반사 거울의 반사율을 3중 공동 필터보다 감소시킨 설계 (3)은 -25 dB에서의 대역폭이 0.76 nm로 넓어졌고, 같은 반사율을 유지한 설계 (4)는 0.5 nm로 좁아졌다. 설계 (3)은 FOM이 0.30이고 설계 (4)는 0.43으로 증가하였다.

5중 공동 간섭 필터로 181층의

$$[ \text{공기} | L(LH)^8 2L(HL)^8 H(LH)^9 2L(HL)^9 H(LH)^9 2L(HL)^9 H(LH)^9 2L(HL)^9 H(LH)^9 | \text{유리} ] \quad (5)$$

$$[ \text{공기} | L(LH)^8 2L(HL)^8 H(LH)^9 4L(HL)^9 H(LH)^9 4L(HL)^9 H(LH)^9 4L(HL)^9 H(LH)^8 2L(HL)^8 | \text{유리} ] \quad (6)$$

$$[ \text{공기} | L(LH)^8 4L(HL)^8 H(LH)^9 4L(HL)^9 H(LH)^9 6L(HL)^9 H(LH)^9 4L(HL)^9 H(LH)^8 4L(HL)^8 | \text{유리} ] \quad (7)$$

가 가능하며 그림 6에 이들을 비교하였다. 간격층의 차수 증가에 따른 투과 대역의 변화를 잘 보여 주고 있다. 즉 투과 대역폭이 감소하고 투과 대역에서의 잔물결과 삽입 손실이 줄어드는 것을 알 수 있다. 설계 (7)은 FOM이 0.48이고 삽입 손실이 0.1 dB 이하이다.

표 2. 50 GHz (0.4 nm) DWDM 필터.

3중 공동 필터와 4중 공동 필터와 5중 공동 필터의 투과 대역(단위: nm)과 FOM..FOM =  $\frac{BW_{-25dB}}{BW_{-05dB}}$

	3중 공동 필터		4중 공동 필터		5중 공동 필터		
	(13.1)	(13.2)	(13.3)	(13.4)	(13.5)	(13.6)	(13.7)
-0.5 dB	0.18	0.18	0.23	0.22	0.4	0.27	0.24
-25 dB	0.6	0.54	0.76	0.5	0.72	0.56	0.5
FOM	0.30	0.33	0.30	0.43	0.56	0.48	0.48

등가박막 방법

위의 다중 공동 간섭 필터는 각 거울의 반사율, 간격층의 차수, 공동의 수를 적절히 변화시키며 규격을 만족하도록 설계한 것으로, 공동의 수가 증가하면 변수가 많아져 복잡해진다. 다중 공동 필터 설계의 또 다른 방법은 ‘광학박막’ (다성출판사) 5장에서와 같이 등가 박막을 이용하는 방법이다. 위의 3중 공동 필터의 기본 구조는

$$\begin{aligned}
 & [(LH)^9 LL(HL)^9 H(LH)^9 LL(HL)^9 H(LH)^9 LL(HL)^9] \\
 & = [(LH)^9 L | (L(HL)^9 H(LH)^9 L)^2 | L(HL)^9 ] \\
 & = [\text{결합층} | (\text{기본 대칭층})^2 | \text{결합층}] \quad (8)
 \end{aligned}$$

로 쓸 수 있다.

기본 대칭층은  $[L(HL)^9 H(LH)^9 L] = [L(HL)^{18} HL] = [(LH)^{19} L]$ 이다. 기본 대칭층의 등가 굴절률(어드미턴스)은 식(3.57)에 의하여  $N_{eq} = \frac{n_L^{20}}{n_H^{19}}$ 이며, 대칭층을 여러

번 반복하여도 등가 굴절률은 같다. 대칭층과 매질과의 굴절률 차이가 크므로 이들 사이의 반사율이 크다. 반사율을 감소시키기 위하여 1/4 파장 광학 두께로 이루어진 결합층을 대칭층과 매

질 사이에 넣을 수 있다. [공기|결합층( $N_{eq}$ |결합층|유리)의 경우 결합층은  $[(LH)^9 L]$ 가 된다.

기본 대칭층은  $[L^m(HL)^{18} HL^m]^q$ 와 같이 표현할 수 있으며  $m$ 은 간격층의 차수이다.  $m = 1, 3, 5$ 일 때 등가 굴절률의 분산이 그림 7과 같다. 기본 대칭층의 차수가 증가할수록 등가 굴절

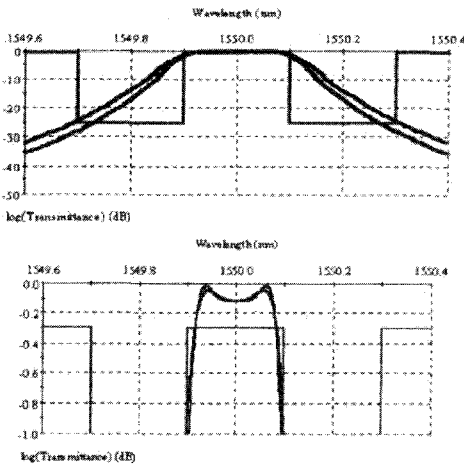


그림 4. 50 GHz (0.4 nm) 3중 공동 간섭 필터

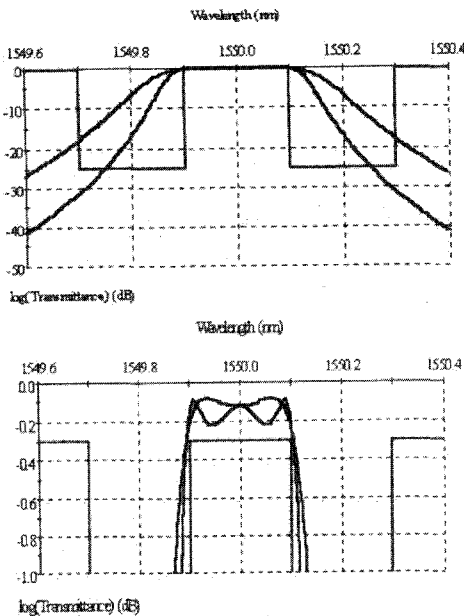


그림 5. 50 GHz (0.4 nm) 4중 공동 간섭 필터

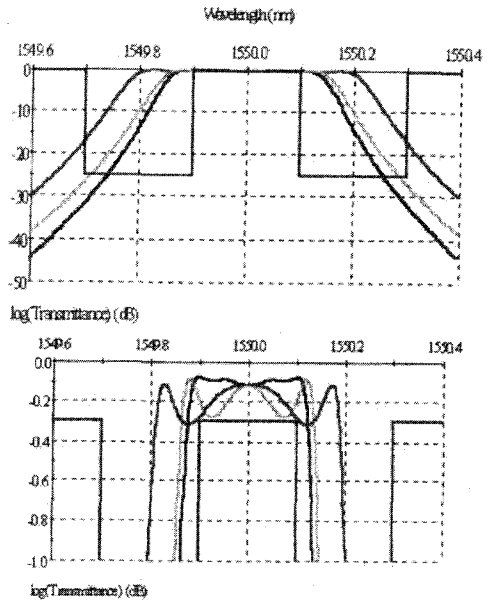


그림 6.

률의 분산이 크고, 반사 대역에서 등가 굴절률은 허수이다.  $m = 1, 3, 5$ 일 때의 설계는 각각

$$[\text{공기}|L(LH)^9 L(L(HL)^{18} HL)^2 L(HL)^9 \text{유리}] \quad (9)$$

$$[\text{공기}|L(LH)^9 L(LL(HL)^{18} HLLL)^2 L(HL)^9 \text{유리}] \quad (10)$$

$$[\text{공기}|L(LH)^9 L(LLLLL(HL)^{18} HLLLLL)^2 L(HL)^9 \text{유리}] \quad (11)$$

과 같으며, 투과율은 그림 8이고 FOM은 표 3과 같다. 설계 (10)은  $-0.5$  dB에서  $0.19$  nm로 규격에 가까우며,  $-25$  dB에서  $0.6$  nm이고, FOM은  $0.31$ 이다. 설계(11)은  $-0.5$  dB에서  $0.13$  nm로 규격보다 작고,  $-25$  dB에서  $0.46$  nm이며, FOM은  $0.29$ 이다. 공기 쪽의 L은 투과 대역의 투과율을 증가시키기 위하여 사용한 결합층이다. 투과 대역의 모양을 직사각형에 가까이 하기 위해서  $m = 5$ 인 기본 대칭층의 양쪽에  $m = 1, 3$ 인 대칭층을 추가할 수 있다. 이 경

우 높아 투과 대역이 좁은 필터와 넓은 필터를 연결하면 투과 대역을 변화시킬 수 있다. 즉

$$[\text{공기}|L(\text{LH})^9L(\text{L}(\text{HL})^{18}L)(\text{LLL}(\text{HL})^{18}H\text{LLL})^2(L(\text{LH})^{18}L)L(\text{HL})^9|\text{유리}] \quad (12)$$

$$[\text{공기}|L(\text{LH})^9L(\text{L}(\text{HL})^{18}L)(\text{LLLLL}(\text{HL})^{18}H\text{LLLLL})^2(L(\text{LH})^{18}L)L(\text{HL})^9|\text{유리}] \quad (13)$$

는 각각이 [공기|결합층|(m = 1인 기본 대칭층)|(m = 3, 5인 고차 대칭층)|(m = 1인 기본 대칭층)|결합층|유리]의 구조이며, 투과율은 그림 9와 같다. 설계 (12)는 -0.5 dB에서 투과 대역폭이 0.36 nm로 넓으며 -25 dB에서 0.46 nm 이고, FOM은 0.77으로 비교적 투과 대역이 직사각형에 가깝다. 설계 (13)은 -0.5 dB에서 0.22 nm, -25 dB에서 0.38 nm로 FOM은 0.58이다.

표 3. 등가 굴절률을 이용한 50 GHz(0.4 nm) DWDM 필터의 투과 대역폭(단위: nm)과 FOM

	등가 굴절률 방법이용 다중 공동 간섭 필터			
	(13.10)	(13.11)	(13.12)	(13.13)
-0.5 dB	0.19	0.13	0.36	0.22
-25 dB	0.60	0.46	0.46	0.38
FOM	0.31	0.29	0.77	0.58

(2) 넓은 대역 투과 필터

등가 박막 방법을 이용하면 공동의 수가 많은 넓은 대역 투과 필터를 설계할 수 있다. 그림 13.10은 투과 대역이 1530~1546 nm이고, 반사 대역이 1548~1560 nm인 대역 투과 필터( $\lambda_0 = 1538 \text{ nm}$ )이다. 설계는

$$[\text{공기}|(\text{LH})^4L(\text{L}(\text{HL})^3\text{HLH}(\text{LH})^3L)(\text{LLL}(\text{HL})^3\text{HLLLLLH}(\text{LH})^3\text{LLL})^6(L(\text{HL})^3\text{HLH}(\text{LH})^3L)L(\text{HL})^4L|\text{유리}] \quad (14)$$

이다. (L(HL)<sup>3</sup>HLH(LH)<sup>3</sup>L)이 기본 대칭층이고, 투과 대역을 맞추기 위하여 기본 대칭층을 6번 반복하였고, 투과 대역의 잔물결을 줄이기 위하여 (LLL(HL)<sup>3</sup>HLLLLLH(LH)<sup>3</sup>LLL)과 같이 대칭층의 차수는 3, 대칭층의 가운데에 LL을 삽입하였다. 또한 대역폭을 맞추기 위하여 낮은 차수를 기본 대칭층 양 쪽에 삽입하였다. 투과 대역폭이 15 nm이고 삽입 손실이 0.3 dB이하, 격리가 25 dB 이하인 넓은 대역 투과 필터이다. -0.5 dB에서의 투과 대역폭은 18 nm이고, -25 dB에서의 대역폭은 23 nm이며, FOM = 0.77이다. 유리 옆의 L은 투과 대역의 잔물결을 줄이기 위한 결합층이다.

같은 방법으로 C-대역인 1530-1560 nm를 투과시키고 L-대역인 1560-1620 nm를 반사시키는 투과 대역폭이 30 nm인 넓은 대역 투과 필터를 그림 11과 같이 설계할 수 있다. 설계는

$$[\text{공기}|(\text{LH})^3L(\text{L}(\text{HL})^2\text{HLH}(\text{LH})^2L)(\text{LLL}(\text{HL})^2\text{HLLLLLH}(\text{LH})^2\text{LLL})^5(L(\text{HL})^2\text{HLH}(\text{LH})^2L)L(\text{HL})^3L|\text{유리}] \quad (15)$$

이며  $\lambda_0 = 1545 \text{ nm}$ , 기본 대칭층은 (L(HL)<sup>2</sup>HLH(LH)<sup>2</sup>L)이고, 대칭층의 차수는 3이고 투과 대역을 맞추기 위하여 대칭층을 5번 반복하고 낮은 차수의 대칭층을 연결하였으며, 잔물결을 줄이기 위하여 대칭층의 중간에 LL을 삽입하였다. -0.5 dB 투과 대역폭은 34 nm이고, -25 dB 투과 대역폭은 44 nm이며, FOM은 1.3이다. 삽입 손실은 0.3 dB이하이고 격리는 25 dB 이하이다.



(3) 추가/탈락 필터

파장 다중 합치기 필터에서 여러 파장을 광섬유에 넣어 장거리를 전송하면 파장 다중 분할기가 이 파장들을 다시 분리하여 각각의 광검출기로 보내게 된다. 광섬유를 통하여 장거리 전송하는 중간에서 특정 파장에 들어 있는 정보를 탈락시키고 같은 파장에 다른 정보를 넣어 계속 전송을 할 수 있는 필터를 광학적 추가-탈락 필터라 한다. 즉 장거리 광섬유 전송에서 선택적으로 파장을 탈락시키고 추가시키는 필터이다. 광학 박막을 수동형 추가/탈락 필터로 사용할 경우 좁은 대역 필터가 가능하다. 그림 12의 좁은 대역 투과 필터는  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ 의 파장이 들어오면,  $\lambda_1$ 을 투과하여 탈락시키고  $\lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_N$ 을 반사시킨다. 또한 탈락한 쪽에서  $\lambda_1$ 이 입사하면 출력 쪽으로  $\lambda_1$ 을 추가시켜  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ 를 전송시킨다.

이 경우 추가한  $\lambda_1$ 은 투과 대역폭 내에서의 작은 반사율 때문에 탈락 쪽으로 일부 들어갈 수 있다. 같은 방법으로 탈락 파의 일부가 출력으로 반사되어 들어갈 수 있다. 탈락과 추가 파장이 같으므로 이들을 구별할 수 없으며, 이는 가간섭성(coherent) 교차대화가 된다. 따라서 추가/탈락 필터는 투과 대역폭 내에서 투과율이 매우 높아야 하고 반사 삽입 손실이 매우 작아야 한다.

3. 이득 평탄 필터

광섬유의 흡수, 산란, 불순물, 미세결함 등에 의한 광신호의 손실 때문에 광신호는 수십 km를 통과한 후 감소하며, 장거리 광통신에서는 손실에 의해 약해진 광신호를 증폭시키기 위한 광증폭기가 필요하며, 특히 어븀 이온이 첨가된 광섬유증폭기(EDFA)를 많이 사용한다.

EDFA의 펌핑 광원은 980 nm와 1480 nm를 사용한다. 펌핑 광원에 의해 높은 에너지 상태로 여기된 어븀 원자는 낮은 바닥 에너지 상태로 떨어

어지면서 1520~1620 nm 사이의 넓은 파장 영역의 빛을 방출한다. 이 때 준안정(metastable) 에너지 상태에 있는 Er 원자들의 수명은 매우 길어 밀도반전이 일어날 수 있으며, 파장  $\lambda_1$ 의 약한 광신호가 들어오면 이 파장의 에너지 상태에 있는 원자들이 유도 방출(stimulated emission)에 의하여  $\lambda_1$ 의 빛이 방출된다. EDFA를 진행하면서 광신호는 EDFA의 이득(gain)에 따라 증폭이 되며, 증폭된 광신호는 다시 광섬유를 따라 전달된다. C-대역 EDFA의 증폭 영역은 1528~1561 nm이고, L-대역 EDFA는 1561~1620 nm 영역이다.

EDFA의 이득 분포는 파장마다 다르므로 여러 파장을 증폭시키는 DWDM 시스템의 경우 여러 개의 EDFA를 거치는 동안 특정 파장의 광신호만 점점 증폭이 많이 되고 다른 파장은 작게 증폭될 수 있다. 증폭된 파장의 세기가 매우 커지면 광섬유에서 여러 종류의 비선형 효과를 발생시킬 수 있어 정보가 왜곡될 수 있다. 따라서 이득 분포에 의해 파장마다 다르게 EDFA에서 증폭된 광신호의 세기를 같게 해주어야 한다. 즉 EDFA를 통과한 광신호 중 이득이 높은 파장의 투과율을 줄이고, 이득이 낮은 파장은 그대로 투과시키는 필터가 필요하며, 이를 이득 평탄 필터라 한다. EDFA의 이득 분포가 어븀의 도핑량, 광섬유의 길이, 펌핑 광원의 세기 등에 따라 변하므로 이득 평탄 필터의 설계는 EDFA의 종류

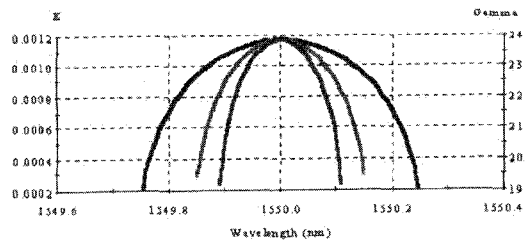


그림 7. m = 1, 3, 5일 때 등가 굴절률의 분산

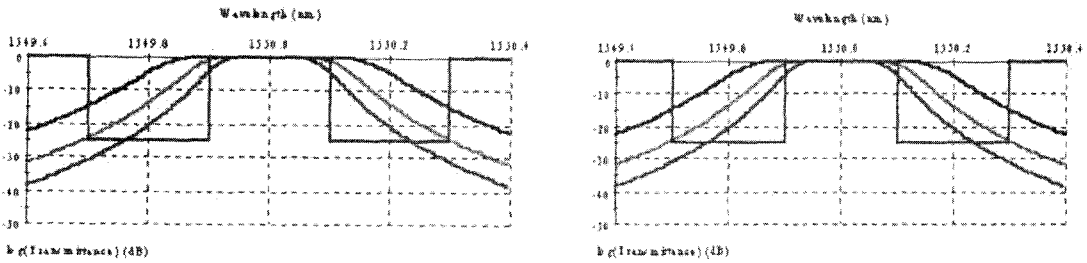


그림 8. 기본 대칭층을 이용한 50 GHz(0.4 nm) DWDM 필터

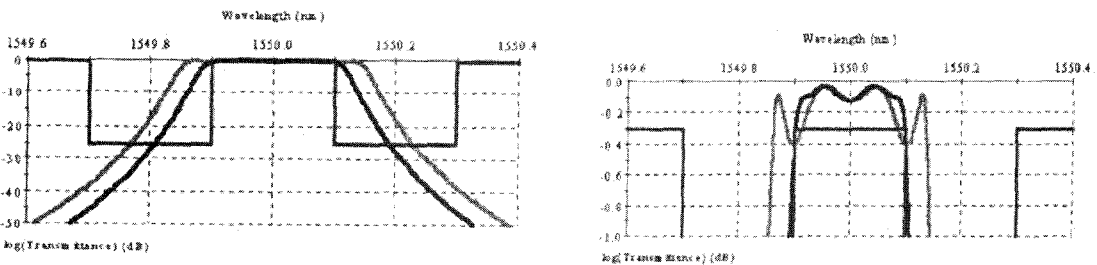


그림 9. 고차 대칭층과 기본 대칭층을 이용한 50 GHz(0.4 nm) DWDM 필터

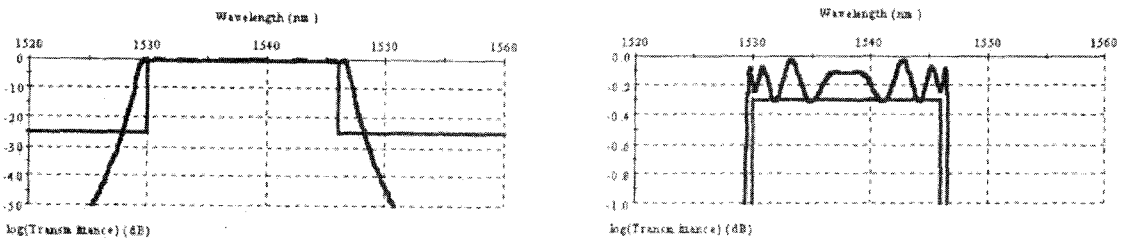


그림 10. 다중 공동 간섭 필터를 이용한 광대역 필터 (15 nm)

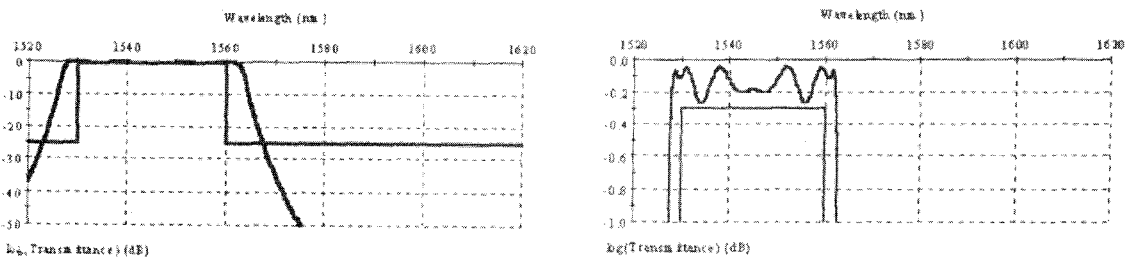


그림 11. 다중 공동 간섭 필터를 이용한 광대역 필터 (30 nm)

마다 다르다.

한 예로 EDFA 이득 평탄 필터의 투과율이 그

림 13(a)와 같아야 할 경우, 한 방법은 과녁이

1530 nm와 1560 nm에서 투과율이 높은 대역

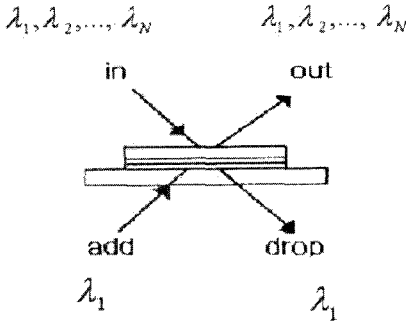


그림 12. 광학적 추가-탈락 필터

이 있으므로, 초기 설계를 간격층의 두께가 두꺼워서 자유 스펙트럼 영역이 작은 패브리-페로 필터로부터 시작할 수 있다. [공기 HLH (LL)<sup>10</sup> HLH | 유리]의 경우 간격층의 두께가 매우 두꺼우므로 차수가 높고 투과 파장들 사이의 간격이 촘촘해진다. 이와 같이 간단한 패브리-페로 필터로부터 출발하여 설계 과녁을 만족하도록 최적화를 시키면, 그림 13(a)와 같이 과녁과 매우 유사한 설계를 얻을 수 있다. 그림 13(b)는 1/4 파장 광학 두께가 아닌 각 층의 두께 분포이

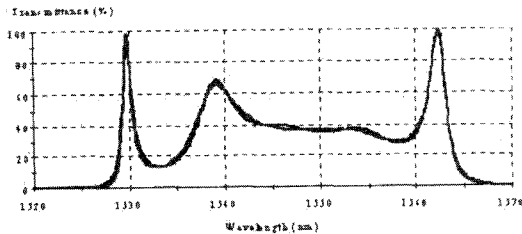


그림 13. 이득평탄 필터의 (a) 과녁과 설계

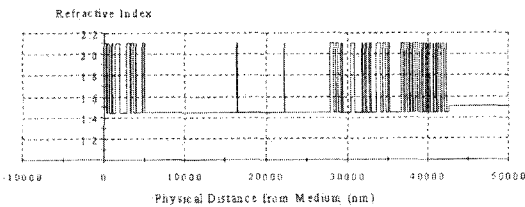


그림 13. 이득평탄 필터의 (b) 굴절률 분포  $H = Ta_2O_5$ ,  $L = SiO_2$ ,  $L = rm SiO_2$  총 68층, 총두께 = 42600 nm.

고, 층수는 68층이며 총 물리 두께는 42596 nm이다. 또 다른 방법으로는 고반사 다층 박막의 투과 대역을 이용하는 방법이다. 고반사 거울 다층 박막의 투과 대역은 그림 4.1과 같이 잔물결로 이루어져 있으며, 이 잔물결의 간격을 적절히 조절하여 과녁과 유사하게 만들면 초기 설계로 활용할 수 있다. 최적화 후 각 층의 광학 두께는 1/4 파장이 아니다.

#### 4. 파장 가변 패브리-페로 필터

지금까지의 필터는 제작할 때 결정된 투과 파장을 변경할 수 없는 수동형 필터이며, 선택적으로 파장을 변경할 수 있는 능동형 투과 필터도 광학 박막으로 가능하다. 예를 들면 패브리-페로 간섭 필터를 회전시켜 입사각을 미세 조절하면 식(5.31)과 같이 최대 투과 파장을 변화시킬 수 있어 파장 가변 필터로 사용할 수 있다. 그러나 입사각이 크면 s-편광파와 p-편광파로 분리되어 두 개의 파장이 투과하므로 이동량을 크게할 수 없다. 다른 방법은 간격층의 굴절률이나 두께를 변화시키는 것이다. 수직 입사이고 거울의 반사 위상이 0일 때 최대 투과 파장(공명 파장)은 5장 으로부터

$$\lambda_m = \frac{2nd}{m} \quad (13.16)$$

으로 주어지며, 여기서  $n$ 은 간격층의 굴절률이고  $d$ 는 간격층의 두께이며  $m$ 은 차수이다. 이 때 최대 투과 파장의 이동량은

$$\Delta\lambda_m = \frac{2}{m} (d\Delta n + n\Delta d) \quad (13.17)$$

로 주어지며,  $\Delta d$ 와  $\Delta n$ 은 각각 간격층과 굴절률의 변화량이다. 만약 간격층의 온도  $T_a$ 를 변

화시킨다면

$$\Delta\lambda_m = \frac{2}{m} \left( d \frac{\partial n}{\partial T_a} + n \frac{\partial d}{\partial T_a} \right) \Delta T_a \quad (13.18)$$

가 되며, 이동량은 간격층의 굴절률 온도 계수와 선폽장 계수에 의해 결정할 수 있다. 두 개의 광섬유 단면에 1/4 파장 다층 광학 박막 거울을 증착하고, 두 광섬유 거울을 서로 가까이 가져오면, 간격층(공동)이 공기이고 간격층 두께(공동 길이)가 두 거울 사이의 거리인 패브리-페로 필터가 된다. 두 거울 사이의 거리는  $d$ 이고 두 거울의 반사율은 모두  $R$ 이라고 하자. 최대 투과 파장의 이동량은 식(17)로부터

$$\Delta\lambda_m = \frac{2n\Delta d}{m} \quad (13.19)$$

가 되며,  $n=1$ 로 공기의 굴절률이다. 투과 파장의 반치폭(FWHM, -3dB)은

$$(\Delta\lambda)_{3dB} = \frac{\lambda_m^2}{nd\sqrt{F}} \quad (13.20)$$

가 되고, 여기서  $F$ 는 예리도 계수(coefficient of finesse)이며

$$F = \frac{4R}{(1-R)^2} \quad (13.21)$$

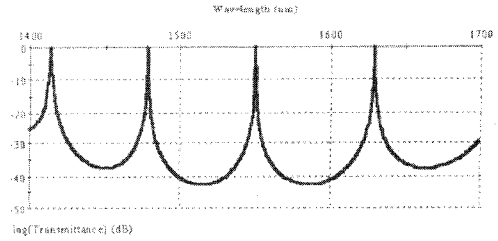
로 주어진다. 차수가 인접한 두 개의 최대 투과 파장 사이의 간격을 자유 스펙트럼 영역(free spectral range)이라 하며

$$(\Delta\nu)_{FSR} = \nu_{m+1} - \nu_m = \frac{c}{2nd} \quad (13.22)$$

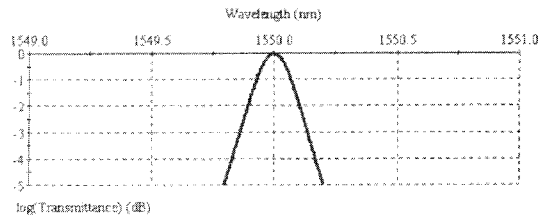
$$(\Delta\nu)_{FSR} = \lambda_m - \lambda_{m+1} = \frac{\lambda_m^2}{2nd\sqrt{F}} \quad (13.23)$$

로 주어진다. 이 때 자유 스펙트럼 영역과 투과 파장의 반치폭의 비를 예리도 (finesse)  $F$ 라 하며,

$$F = \frac{(\Delta\lambda)_{FSR}}{(\Delta\lambda)_{3dB}} = \frac{\pi}{2} \quad (13.23)$$



(a)



(b)

그림 14. 파장 가변 패브리-페로 필터. (유리 | L(HL)8|Air |L(HL)8|유리),  $H = \text{TiO}_2$ ,  $L = \text{SiO}_2$ ,  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ ,  $\text{Air} = 10\lambda_0$

가 된다. 거울 사이의 거리가 증가할수록 차수가 증가하며 자유 스펙트럼 영역은 감소하고 투과 파장의 반치폭은 좁아진다. 그림 13.14는 1550 nm에서 거울사이의 거리가 15500 nm일 때 가변 파장 필터의 투과 스펙트럼이다.  $m=10$ 이고,  $(\Delta\lambda)_{FSR} = 80 \text{ nm}$ ,  $(\Delta\nu)_{FSR} = 10 \text{ THz}$ ,  $F=200$ ,  $(\Delta\lambda)_{3dB} = 0.4 \text{ nm}$ ,  $(\Delta\nu)_{3dB} = 50 \text{ GHz}$ 인 파장 가변 패브리-페로 필터이다.

## 5. 증착 방법

WDM 필터는 제작 방법에 따라 광학 박막을

이용하는 간섭 필터, 정렬 광도파로(arrayed waveguide), 광섬유 브래그(Bragg) 격자 등으로 분류하고 있으며, 광학 박막 간섭 필터와 광섬유 브래그 격자를 조합한 혼성 DWDM 기술도 개발하고 있다[12]. 채널 간격이 100 GHz 이상으로 넓으면 제작 기술이 많이 축적되어 있고 온도에 안정한 광학 박막 간섭 필터를 많이 사용하고 있으며, 채널 간격이 50 GHz 이하인 필터도 증착 기술의 빠른 발전에 따라 가능할 것으로 기대된다. 광학 박막 DWDM 필터는 채널 간격이 넓을 경우 삽입 손실이 작고, 투과 영역이 평평하며, 채널사이의 격리가 잘 되어 있고, 온도에 대한 파장 이동이 작으며, 편광의존 손실이 작다.

기존의 전자빔 증착 박막은 기둥 미세구조이어서 온도, 습도 등의 외부 환경에 약하므로, 박막이 조밀하며 외부 환경에 강해야 하는 DWDM 필터는 이온빔 보조 증착(그림 8.4), 플라즈마 보조 증착 방법(그림 8.6), 이온빔 보조 스퍼터링(그림 9.4), 이온빔 스퍼터링(그림 9.5) 등의 방법으로 제작되고 있다.

DWDM 필터의 증착 물질로는 비정질 고굴절률 박막으로 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>를 사용하고 저굴절률 박막으로는 SiO<sub>2</sub>를 사용한다. 박막의 굴절률은 덩어리의 값에 가까워 습도와 온도 변화에 대한 스펙트럼의 이동이 없어야 한다. 따라서 이온빔을 이용하여 조밀도가 거의 1이고 굴절률의 오차가 0.01%이하인 균일한 박막을 증착해야 한다. 이온빔을 사용할 때 일반적으로 나타나는 박막의 압축 응력이 크지 않아야 한다.

또한 좁은 투과폭과 최고 투과 파장을 맞추기 위하여 선풍이 매우 좁은 광학 감시기를 이용한다. 100 여 층이 넘는 필터의 경우 각 층의 두께를 정확히 맞추어야 하므로, 감시 유리판을 따로 사용하지 않고 기판을 투과한 빛을 직접 측정한다.

다. 각 층의 광학 두께를 정확히 측정해야 하고, 증착 중 설계로부터 벗어났을 때 이를 보상할 수 있어야 한다. 수정 진동자로는 증착율과 물리 두께를 측정한다. 각 층의 두께 오차는 0.01 % 이하이어야 한다. 각 층의 두께 오차가 매우 작으므로, 박막의 두께 균일도가 매우 높아야 하고 기판의 회전속도는 600 rpm 이상으로 매우 높아야 한다. 다중 공동 필터의 경우 광학 감시기에서 투과율의 변화가 작은 연결층은 두께 오차가 클 수 있으며, 오차에 대한 민감도는 간격층(공동) 다음의 층이 매우 높다.

전자 빔 증착의 경우 증착 중 전자빔에서 아크가 없어야 한다. DWDM 필터의 증착 물질로는 고굴절률 박막으로 디스크형의 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>와 저굴절률 박막으로 입자형 SiO<sub>2</sub>를 사용하며, 각 물질에 대해 전자빔 총을 따로 사용한다. 이온빔 스퍼터링의 경우 산소 분위기에서 장시간 이용할 수 있도록 스퍼터링 이온총과 보조용 이온총 모두 RF형을 사용한다. 이온빔 스퍼터링은 전자빔 방법보다 증착률이 낮아 증착 시간이 오래 걸리나 각 층의 두께와 굴절률을 보다 정확히 조절할 수 있다.

**‘박막광학’**

황보장권 교수 저서

황보장권 교수(인하대학교 물리학과)는 ‘박막광학’ (다성출판사)을 출간했다. 광학이나 박막 광학을 전공하는 대학원생뿐 아니라 진공 챔버를 직접 운영하여 박막을 제작하거나 광학 박막을 설계하고 상품화하는 산업계의 연구 및 개발 담당자, 광학 박막의 설계와 제작 및 특성을 분석하는 연구원, 광학 박막을 광학기기·광정보통신 등에 이용하려는 연구원들을 대상으로 하고 있다. 문의 (02)3417-2500