

등가 박막을 이용한 광통신용 파장분할 다중화(WDM) 박막필터 설계

오남석 · 이상현 · 황보창권*

인하대 물리학과

☎ 402-751 인천시 남구 용현동 253

김희경 · 김명진 · 임영민

전자부품연구원 광부품센터

☎ 451-865 경기도 평택시 진위면 마산리 455-6

(2003년 7월 22일 받음, 2003년 10월 2일 수정본 받음)

광통신용 WDM 박막필터를 다중 공동 구조에 의한 방법과 등가 박막을 이용한 방법으로 설계하였고 특징을 비교하였다. 다중 공동 필터는 공동의 수가 증가함에 따라 변수(공동의 수, 각 거울의 주기수, 간격층의 차수)가 많아 설계가 매우 복잡해 지므로, 보다 실용성 있는 설계를 위해 대칭적으로 변수를 변화시켜 설계하였다. 다중 공동 구조에 의한 방법은 일반적으로 사용되는 4중, 5중 공동 필터를 대칭적으로 변수를 변화시켜 각각 100 GHz, 50 GHz DWDM 박막필터를 설계하기 위한 조건을 제시하였고, 또한 다중 공동 필터를 등가 박막으로 해석하여 변수를 최소화하고, 등가 박막의 특성과 WDM 필터의 규격이 대응되도록 설계과정을 일반화시켜 WDM 박막필터를 설계하였다. 두 방법을 비교한 결과 중요한 특징은 다중 공동 구조에 의한 방법은 변수를 적절히 변화시키는 방법을 사용하고 있어 시행착오를 거쳐야 하지만, 등가 박막을 이용한 방법은 체계적이고 정량화된 설계를 할 수 있다.

주제어 : narrow bandpass filter, multiple cavity filter, symmetrical period, equivalent admittance.

I. 서 론

최근 광통신 분야에서는 데이터 용량이 급격하게 증가하면서 대용량의 정보를 전달하기 위해 가장 경제적이고 효율적인 파장분할 다중화(Wavelength Division Multiplexing, WDM) 전송 기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. WDM 전송 기술은 하나의 광섬유에 여러 개의 서로 다른 파장을 사용하여 전송하는 기술로써, 사용하는 파장(채널)의 수와 간격에 따라 단거리 전송에 사용되는 저밀도 파장분할다중화(Coarse WDM, CWDM) 전송기술과 장거리 전송에 사용되는 고밀도 파장분할다중화(dense WDM, DWDM) 전송기술로 구분되며, DWDM 전송기술에서는 사용하는 파장 간격을 좁힘으로써 점진적 전송 용량을 증가시키고 있다. WDM 전송기술의 핵심소자인 WDM 필터는 광학 박막을 이용할 경우 Fabry-Prot형의 좁은 대역 투과 필터(narrow bandpass filter)가 주로 사용된다.^[1,2] 박막필터는 WDM 필터의 규격을 충분히 만족시킬 수 있는 설계를 할 수 있고 열팽창 계수가 큰 기판을 사용하여 중심파장의 이동을 최소화할 수 있으며,^[3] 제작 기술의 발달로 증착 과정이 안정하고 높은 질의 필름을 만들 수 있다. 또한, 광학 모니터링 시스템(optical monitoring system)을 이용하면 필터를 제작하는데 있어 매우 정확하게 광학 두께를 제어할 수 있다.^[4,5] 그러므로 적은 삽입손실(insertion loss), 평평한 투과대역, 잔물결(ripple), 옆 채널과의 큰 격리(isolation), 투과대역폭

등의 규격을 만족시키는데 박막필터가 매우 유리한 조건이다. 이러한 특징은 광학 박막의 설계와 제작 방법에 의하여 결정된다.

WDM 박막필터의 제작은 이온빔과 플라즈마를 이용한 보 증착과 이중 이온빔 스퍼터링 방법을 주로 사용하고 있으며, 필터를 제작하기 이전에 규격을 만족하는 필터를 설계하고 제작 장비에 관련된 변수 등을 고려하여 최적의 설계를 선택하는 것이 매우 중요한 과제 중의 하나이다.

WDM 박막필터는 1/2 파장 광학 두께의 정수배로 이루어진 간격층(spacer)과 양쪽에 1/4 파장 광학 두께의 고굴절률과 굴절률 박막을 교대로 반복한 거울층으로 구성되기 때문에, 격층의 차수, 거울의 주기수(반사율), 거울의 반사위상 등을 고려하여 설계하여야 한다. 또한 WDM 박막필터의 규격은 이적으로 직사각형이어야 하므로, 스펙트럼이 삼각형을 이루는 단일 공동 필터는 사용할 수 없다. 따라서 단일 공동 필터 연결층(coupling layer)을 사용하여 연결시킨 다중 공동 필터(multiple cavity filter)를 사용하여 설계하여야 한다.^[6]

다중 공동 필터는 공동의 수가 증가함에 따라 변수(공동 수, 거울의 주기수, 간격층의 차수)가 급격히 늘어나게 되 때문에, 매년 시행착오 과정을 겪으면서 설계해야하는 어려움이 있다. 따라서 본 연구는 다중 공동 필터로 설계되는 WDM 박막필터를 다중 공동 구조에 의한 방법과 등가 박막을 이용한 방법으로 설계하고 특징을 비교하였다. 다중 공동 구조에 의한 방법은 일반적으로 사용되는 4중, 5중 공동 필터를 대칭적으로 변수를 변화시켜 각각 100 GHz, 50 GHz

E-mail: hwangbo@inha.ac.kr

DWDM 박막필터를 설계하기 위한 조건을 제시하였고, 또한 다중 공동 필터를 등가 박막으로 해석하여 변수를 최소화하고, 등가박막의 수식과 WDM 필터의 규격이 대응되도록 설계과정을 일반화시켜 WDM 박막필터를 설계하였다.

II. WDM 박막 필터의 규격

WDM 박막필터의 설계는 1/4 파장 광학 두께 고굴절률 박막(H)인 Ta₂O₅(2.07@1550 nm)와 저굴절률 박막(L)인 SiO₂(1.47@1550 nm)를 사용하였으며, 연결층과 간격층은 흡수가 작은 저굴절률 박막(L) SiO₂를 사용하였다. 기판은 유리(glass, 1.50@1550nm)로 사용하였으며, 일반적인 WDM 필터의 규격을 표 1에 나타내었다.

III. 다중 공동 구조에 의한 방법

다중 공동 필터는 단일 공동 필터(밑줄 그은 부분)를 연결층 L을 사용하여 직렬로 연결한 구조로써, 일반적인 구조는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 본 절에서는 이 구조를 [I-H-G/F-E-D/C-B-A](오른쪽이 기판)와 같이 거울의 주기수와 간격층의 차수만으로 간단히 사용할 것이다.

$$[공기\{\dots (HL)^L H (LL)^H H (LH)^G L (HL)^F H (LL)^E H (LH)^D L (HL)^C H (LL)^B H (LH)^A \text{기판}\} \dots / I-H-G/F-E-D/C-B-A] \quad (1)$$

다중 공동 필터를 설계하기 위해서는 식 (1)에서와 같이 필터의 특징을 결정하는 변수인 공동의 수, 각 공동에서의 거울의 주기수(A, C, D, F, G, I, ...)와 간격층의 차수(B, E, H, ...)를 적절하게 변화시켜야 한다. 필터를 설계할 때의 초기 설계는 투과 반치폭에 근접한 변수를 찾는 것이 중요하며, 일반적으로 필터의 투과 반치폭은 거울의 주기수가 증가할수록 큰 폭으로 줄어들며, 간격층의 차수가 증가할수록 작은 폭으로 줄어든다.

표 1. 일반적인 광통신용 WDM 필터의 규격^[4,7]

Specification	DWDM filter			CWDM filter	
	100 GHz	50 GHz	25 GHz	Center Wavelength	1470, 1490, 1510, 1530, 1550, 1570, 1590, 1610 nm
BW @-0.5 dB	>0.4 nm	>0.25 nm	>0.1 nm		> 15 nm
BW @-25 dB	<1.2 nm	<0.6 nm	<0.3 nm		< 25 nm
Insertion loss	<0.8 dB	<1.0 dB	<1.2 dB		< 0.35 dB

표 2. 거울의 주기수와 간격층의 차수에 따른 모든 경우의 수

구분	구조(변수)	4-cavity		5-cavity	
		A-B-C/D-E-F/G-H-I/J-K-L	A-B-C/D-E-F/G-H-I/J-K-L	A-B-C/D-E-F/G-H-I/J-K-L/M-N-O	A-B-C/D-E-F/G-H-I/J-K-L/M-N-O
비대칭 구조	경우의수	거울의 주기수	65,536	1,048,567	
		간격층의 차수	625	3,125	
		계	40,960,000	3,276,771,875	
대칭 구조	경우의수	거울의 주기수	25	125	
		간격층의 차수	25	125	
		계	625	15,625	

DWDM 박막필터의 투과 반치폭은 1 nm 보다 작기 때문에 거울의 주기수를 많이 증가시켜야 하며, 간격층의 차수를 적절히 변화시켜야 투과대역을 미세하게 조절할 수 있다.

100 GHz, 50 GHz DWDM 박막필터에 주로 적용될 수 있는 4중, 5중 공동 필터에 대해서, 일정한 조건(7<거울의 주기수≤10, 1<간격층의 차수≤5)으로 필터의 최적조건을 찾기 위해 가능한 경우의 수를 대칭구조와 비대칭 구조로 나누어 표 2에 나타내었다. 비대칭 구조로 변수를 변화시킬 경우 많은 시행착오 과정을 겪어야 하며 이러한 시행착오 과정을 줄이면서도 필터를 설계할 수 있는 방법 중의 하나는 변수가 대칭구조가 되는 경우이다. 표 2에서 대칭구조가 비대칭 구조보다 훨씬 작은 시행착오를 거치게 됨을 알 수 있으며, 대칭구조의 경우 변수에 따른 필터의 경향을 파악하면 시행착오의 과정은 훨씬 줄어들 것이다.

100 GHz, 50 GHz DWDM 박막필터를 각각 4중, 5중 공동 필터로 설계하기 위해 변수가 대칭구조가 되도록 거울의 주기수(간격층 고정)를 먼저 변화시켜 규격에 접근하는 거울의 주기수를 찾은 다음, 간격층의 차수(거울의 주기수 고정)가 대칭이 되도록 변화시키며 필터를 설계한 결과 몇 가지 필터의 경향을 찾을 수 있었다. 본 논문에서 설계한 필터는 표 3과 4에 각각 나타내었다.

거울의 주기수 변화에 따른 100 GHz 4중 공동 필터의 특성을 그림 1과 그림 2에 나타내었다. 양쪽 끝의 공동에서의 거

표 3. 거울의 주기수 변화(간격층 고정)에 따른 필터설계의 예

구분	설계	삽입그림	특징
설계(1)	7-4-7/9-4-9/9-4-9/7-4-7	그림 1	거울의 주기수의 차가 큰 경우
설계(2)	9-4-9/7-4-7/7-4-7/9-4-9		
설계(3)	7-4-8/9-4-10/10-4-9/8-4-7		
설계(4)	8-4-8/8-4-8/8-4-8/8-4-8	그림 2	거울의 주기수의 차가 작은 경우
설계(5)	9-4-9/8-4-8/8-4-8/9-4-9		
설계(6)	8-4-8/9-4-9/9-4-9/8-4-8		

표 4. 간격층의 차수변화(거울의 주기수 고정)에 따른 필터설계의 예

구분	설계	그림	규격
설계 (7)	8-2-8 / 8-8-8 / 8-8-8 / 8-2-8	그림 3	100 GHz
설계 (8)	8-8-8 / 9-8-9 / 8-8-9 / 8-8-8	그림 4	
설계 (9)	8-2-8 / 8-10-8 / 8-10-8 / 8-2-8		
설계 (10)	8-10-8 / 9-10-9 / 9-10-9 / 8-10-8		
설계 (11)	9-2-9 / 9-8-9 / 9-8-9 / 9-8-9 / 9-2-9	그림 5	50 GHz
설계 (12)	9-2-9 / 9-10-9 / 9-10-9 / 9-10-9 / 9-2-9	그림 6	
설계 (13)	8-6-8 / 9-6-9 / 9-6-9 / 9-6-9 / 8-6-8		
설계 (14)	8-8-8 / 9-8-9 / 9-8-9 / 9-8-9 / 8-8-8		

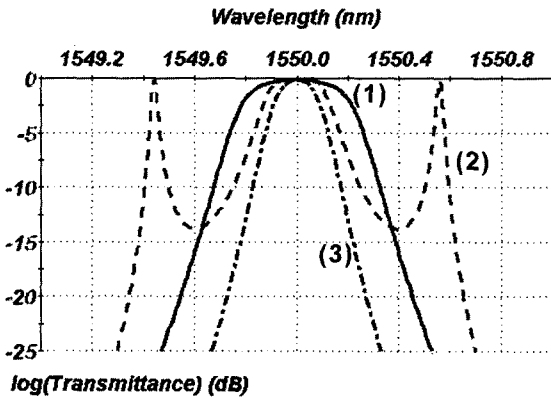


그림 1 4중 공동 필터의 거울의 주기수(간격층 고정, 4L)가 다른 설계(1), (2), (3). 설계(1) 7-4-7 / 9-4-9 / 9-4-9 / 7-4-7, 설계(2) 9-4-9 / 7-4-7 / 7-4-7 / 9-4-9, 설계(3) 7-4-8 / 9-4-10 / 10-4-9 / 8-4-7.

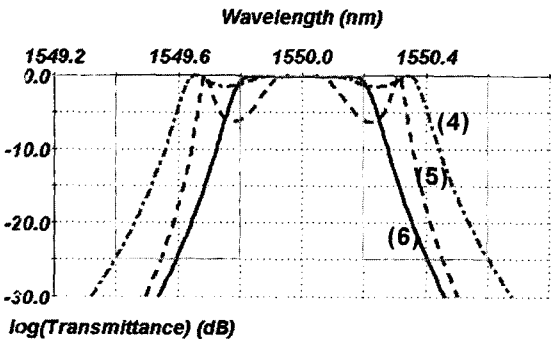
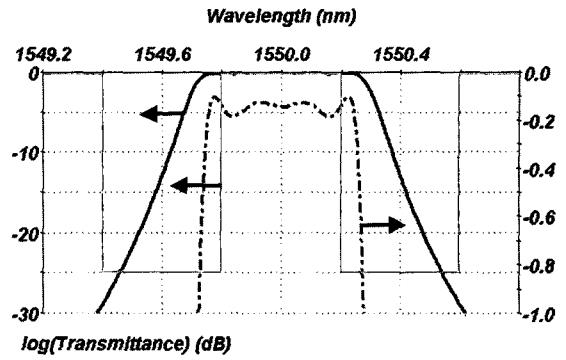
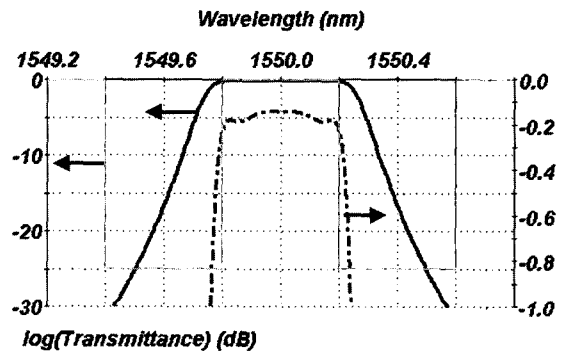


그림 2 4중 공동 필터의 거울의 주기수(간격층 고정, 4L)가 같거나 한 주기 작은 설계 (4), (5), (6). 설계(4) 8-4-8 / 8-4-8 / 8-4-8 / 8-4-8, 설계(5) 9-4-9 / 8-4-8 / 8-4-8 / 9-4-9, 설계(6) 8-4-8 / 9-4-9 / 9-4-9 / 8-4-8.

의 주기수가 작은 설계 (1), (3)의 경우는 투과대역(-0.5 dB)의 모양이 둥글게 변하는 것을 볼 수 있으며, 양끝 부분의 공동이서의 거울의 주기수 차가 큰 설계 (2)의 경우는 잔물결이 매우 크게 나타나는 것을 알 수 있다.^[8] 따라서 거울의 주기수가 크게 다르게 되면 필터의 규격에 접근하는 설계를 찾을 수 없다. 그림 2와 같이 거울의 주기수를 같게 하거나 한 주기 작은 경우에 그림 1보다 필터의 특성이 좋아지는 것을 볼 수 있으며, 거울의 주기수가 동일한 설계(4)와 양끝 공동에서 거울의 주기수가 한 주기 작은 설계(6)으로부터 규격에 가

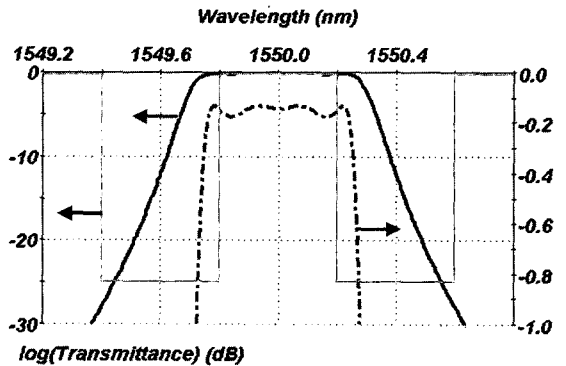


(a) 설계 (7) 8-2-8 / 8-8-8 / 8-8-8 / 8-2-8

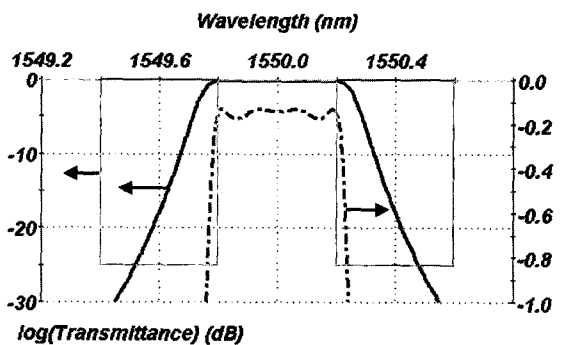


(b) 설계 (8) 8-2-8 / 8-10-8 / 8-10-8 / 8-2-8

그림 3. 초기 설계 (4)로부터 100 GHz DWDM 박막필터에 접근한 설계 (7), (8).

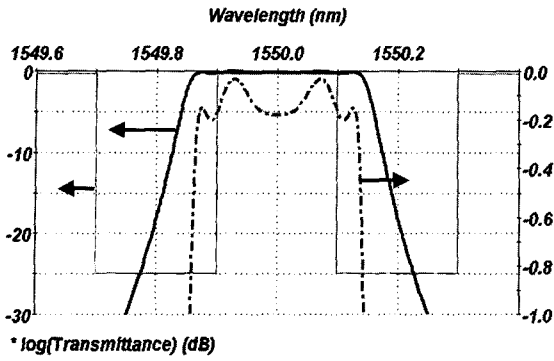


(a) 설계(9) 8-8-8 / 9-8-9- / 8-8-9 / 8-8-8

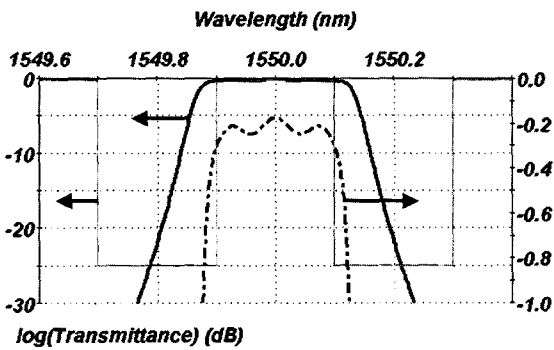


(b) 설계(10) 8-10-8 / 9-10-9- / 9-10-9 / 8-10-8

그림 4. 초기 설계 (6)으로부터 100 GHz DWDM 박막 필터에 접근한 설계 (9), (10).

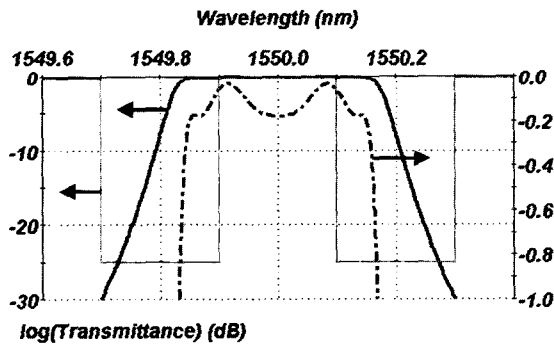


(a) 설계(11) 9-2-9 / 9-8-9- / 9-8-9 / 9-2-9

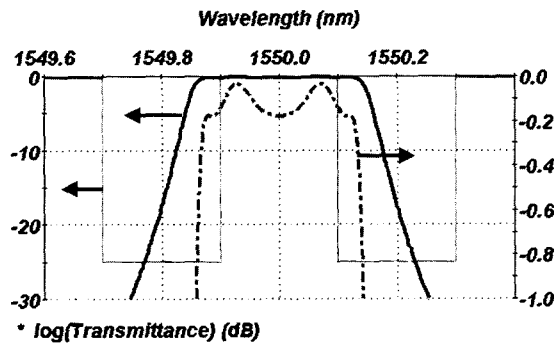


(b) 설계(12) 9-2-9 / 9-10-9- / 9-10-9 / 9-2-9

그림 5. 초기 설계 (4)로부터의 50 GHz DWDM 박막필터에 접근한 설계 (11), (12).



(a) 설계(13) 8-6-8 / 9-6-9 / 9-6-9 / 8-6-8



(b) 설계(14) 8-8-8 / 9-8-9 / 9-8-9 / 8-8-8

그림 6. 초기 설계 (6)으로부터의 50 GHz DWDM 박막필터에 접근한 설계 (13), (14).

까운 설계에 접근할 수 있다.

설계 (4)와 (6)의 경우로부터 거울의 주기수를 고정한 후 간격층을 적절하게 변화시킨 결과, 설계 (4)는 그림 3과 같이 양쪽 간격층의 차수가 비교적 작은 경우인 설계 (7)과 (8)이 되었으며, 설계 (6)은 그림 4와 같이 간격층의 차수가 높으며 같은 경우인 설계 (9)와 (10)이 되어 규격을 만족하는 필터가 된다.

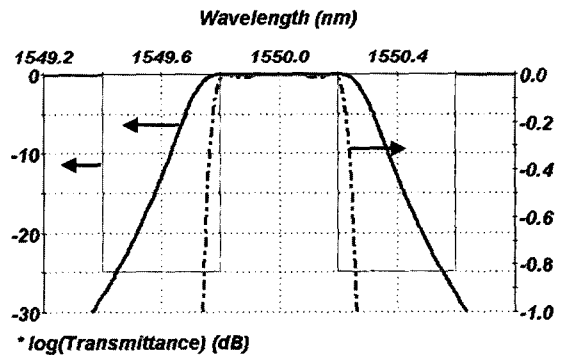
100 GHz DWDM 박막필터의 설계 결과와 같이 5중 공동 필터의 50 GHz DWDM 박막필터도 같은 방법으로 설계할 수 있으며, 그 결과는 설계(11), (12), (13), (14)이며 그림 5와 6에 나타내었다.

최종적으로 1/4 파장 광학 두께가 아닌 무반사 층을 공기쪽에 삽입함으로써 투과대역(-0.5 dB)에서의 삽입손실과 잔물결을 줄일 수 있다. 예를 들어 설계(7)과 설계(12)의 최종 무반사 층을 삽입한 결과는 각각 설계(15)과 설계(16)와 같으며, 그림 7에 설계 결과를 나타내었다.

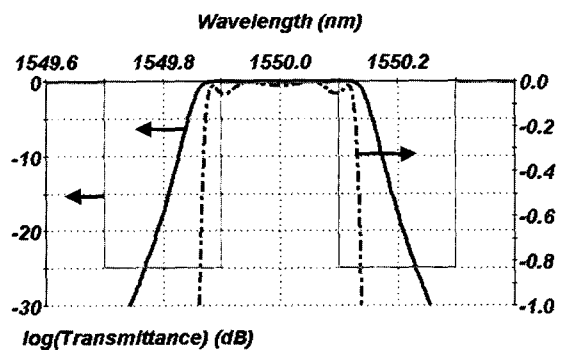
설계(15) 공기¹¹.3275L 0.3597H (HL)⁸H 2L H(LH)⁸
L(HL)⁸H 8L H(LH)⁸L(HL)⁸H 8L H(LH)⁸
L(HL)⁸H 2L H(LH)⁸유리

설계(16) 공기¹¹.4268L 2.299H (HL)⁸H 8L H(LH)⁸L(HL)⁹
H 8L H(LH)⁹L(HL)⁹H 8L H(LH)⁹L(HL)⁹
H 8L H(LH)⁹L(HL)⁸H 8L H(LH)⁸유리

4중 공동 필터와 5중 공동 필터를 대칭적으로 변수를 변화시킨 결과 거울의 주기수가 모두 동일하고 양끝 공동에서의 간격층이 작은 경우(설계I)와 양끝 공동에서의 거울의 주기수



(a)



(b)

그림 7. (a) 최종 100 GHz DWDM 박막필터 설계(15)과 (b) 최종 50 GHz DWDM 박막필터 설계(16).

5. 다칭 구조의 경우 다중 공동 필터의 설계 조건

구분	설계 I	설계 II
굴절률	s-a-s/s-b-s/s-b-s/s-a-s	p-a-p/s-a-s/s-a-s/p-a-p
굴절률	s-a-s/s-b-s/s-b-s/s-b-s/s-a-s	p-a-p/s-a-s/s-a-s/s-a-s/p-a-p
관계식	a < b	p = s-1

모두 한 주기 작고 간격층의 차수가 모두 동일한 경우(설계 I)에 필터를 설계할 수 있었으며, 표 5에 구조와 관계식을 요약하였다.

II절에서 설명한 다중 공동 필터에 의한 방법은 비대칭 구조보다 큰 대칭 구조로 변수들을 변화시키는 것이 필터를 설계하는데 편리하며, 이를 바탕으로 4중, 5중 공동 필터의 경우를 위해서 설계 조건을 제시하였다. 그러나 제시한 설계조건은 4중, 5중 공동 필터에 대한 많은 설계 중의 일부 필요조건이기 때문에 요구되는 규격이 달라지게 되면 거울의 주기수(s, p)와 간격층의 차수(a, b)를 결정하기 위해서는 임의의 값으로부터 변수를 변화시키는 과정을 거쳐야 한다.

IV 등가 박막을 이용한 다중 공동 필터 설계 방법

II절에서 보여준 다중 공동 구조에 의한 방법은 변수에 따른 필터의 특성을 쉽게 예측하기 어렵기 때문에 시행착오 과정을 거치면서 필터의 경향을 파악하고 이를 기초로 하여 필터를 설계해야하며, 공동의 수가 더 증가하면 변수 또한 많아지게 되어 매우 복잡해진다.

한편, 그림 8과 같이 대칭구조의 박막은 일층 박막으로 표현할 수 있기 때문에, 필터의 대칭 구조에 등가 박막을 적용할 수 있으며, 그 구조가 비교적 간단해진다. 즉, 그림 8과 같이 굴절률이 각각 n_A, n_B 이고 위상 두께가 δ_A 와 δ_B 로 이루어진 ABA와 같은 대칭구조의 박막은 한 개의 등가 어드미턴스(n_E)와 등가 위상(Δ)를 갖는 등가 박막으로 간주할 수 있으며, 일층의 등가 박막은 주기수(S)를 변화시켜도 위상두께만 변환할 뿐 등가 굴절률은 변하지 않는다.^[6]

대칭 구조로 설계된 설계(13)을 등가 박막으로 표현하면,

$$\begin{aligned}
 & \left[\frac{HL}{LH} \right]^8 \frac{H}{2L} \frac{H(LH)^8}{L(HL)8H} \frac{8L}{2L} \frac{H(LH)^8}{L(HL)8H} \frac{8L}{2L} \frac{H(LH)^8}{L(HL)8H} \\
 & = \frac{(FL)^8 H}{2L} \frac{H(LH)^8 (LH)(LH)^8}{L(HL)8H} \frac{8L}{2L} \frac{H(LH)^8 (LH)(LH)^8}{L(HL)8H} \\
 & \quad \frac{8L}{2L} \frac{H(LH)^8 (LH)(LH)^8}{L(HL)8H} \frac{2L}{2L} \frac{H(LH)^8}{L(HL)8H} \\
 & = \frac{(FL)^8 H}{2L} \frac{(HL)^{17} H}{2L} \frac{2L}{2L} \frac{6L}{6L} \frac{(HL)^{17} H}{2L} \frac{6L}{2L} \frac{H(LH)^8}{L(HL)8H} \\
 & = \frac{(FL)^8 H}{2L} \frac{2L(HL)^{17} H 2L}{6L(HL)^{17} H 6L} \frac{2L(HL)^{17} H}{2L} \frac{H(LH)^8}{L(HL)8H} \\
 & = \text{결합층} \text{ 저차대칭층} \text{ [기본 대칭층]} \text{ 저차대칭층} \text{ 결합층}
 \end{aligned}$$

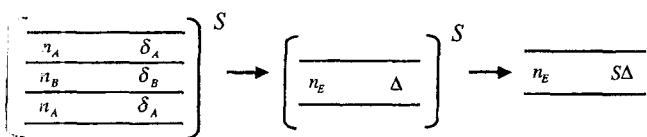


그림 8. 대칭 박막과 등가 어드미턴스

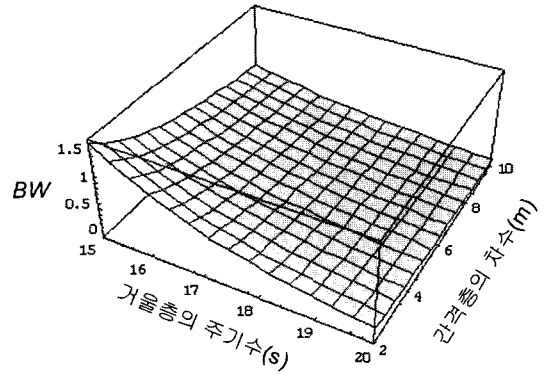


그림 9. 기본 대칭층의 거울층의 주기수(s-1)와 간격층의 차수(m)와 투과 반치폭(BW)과의 관계.

으로 나타낼 수 있다.

등가 박막을 이용한 방법의 장점 중의 하나는 기본 대칭층으로부터 다중 공동 필터의 투과 반치폭을 대략적으로 계산할 수 있다는 것이며, 이로부터 규격을 만족하는 필터에 접근하는지 판단할 수 있다. 기본 대칭층의 층수를 $2s+1$ 개라 하면, $[m \cdot (HL)^{s-1} H \text{ mL}]^q$ ($m=2,4,6\cdots, q=1,2,3\cdots$)로 표현할 수 있으며 m 은 간격층의 차수이고 q 는 기본 대칭층의 반복횟수를 나타낸다. 이 때의 투과 반치폭은

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_0} = \frac{4}{m\pi} \left(\frac{n_L}{n_H} \right)^s \frac{n_H - n_L}{n_H - n_L + n_L/m} \tag{2}$$

이 된다.^[9] 식 (2)로부터 기본 대칭층의 거울의 주기수(s-1)와 간격층의 차수(m)와 투과 반치폭과의 관계를 그림 9에 나타내었다. 투과 반치폭은 거울의 주기수에 의하여 큰 폭으로 변하고 간격층의 차수에 의하여 작은 폭으로 변화하는 것을 알 수 있으며, 식 (2)와 그림 10으로부터 투과 반치폭에 해당하는 거울의 주기수와 간격층의 차수를 결정할 수 있다.

또한, 기본 대칭층의 등가 어드미턴스는

$$n_E = \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{s-1} n_H \tag{3}$$

이 되기 때문에 기본 대칭층만으로 설계하는 경우 공기와 유리와의 어드미턴스차에 의하여 그림 10과 같이 반사손실이 생기게 된다.^[10] 따라서 [입사매질(공기) - 기본 대칭층]와 고차 [기본대칭층-유리] 사이에 각각 무반사 조건이 성립하는 결합층을 삽입하면 반사손실을 줄일 수 있다.

결합층은 기본 대칭층의 등가 어드미턴스 n_E 를 기판으로 가하고 n_E 위에 고굴절률 박막의 개수가 y 개인 결합층 $[(HL)^y]$ 를



그림 10. 결합층 설계-기본 대칭층과 주변매질과의 굴절률차에 의한 반사손실을 감소.

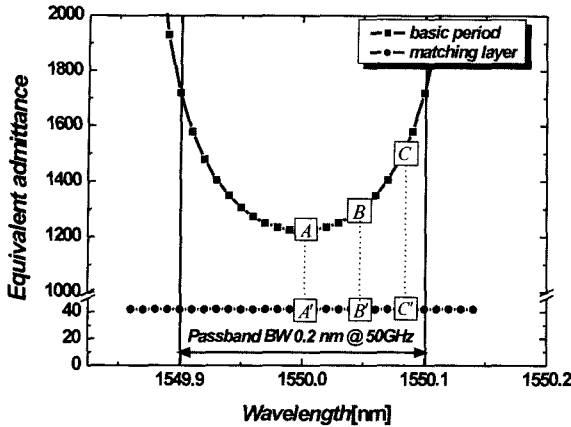


그림 11. 기본 대칭층과 결합층의 등가 어드미턴스 분산.

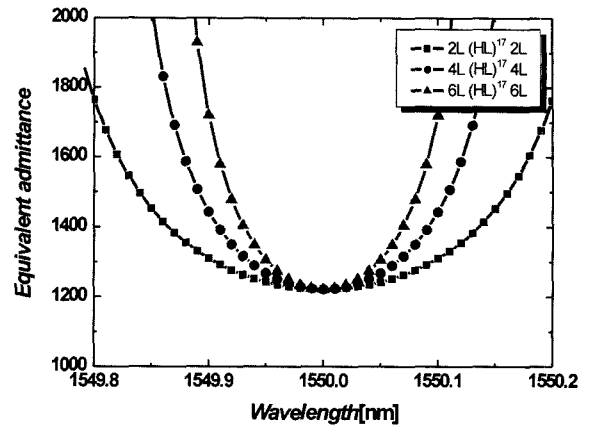


그림 12. 저차대칭층 [nL (HL)^{s-1}H nL]의 n값의 변화에 따른 등가 어드미턴스 분산.

의 등가 어드미턴스 n_m 을 증착한 것으로 간주할 수 있다. 따라서 1/4 파장 광학 두께의 특성에 따라 공기와 기판쪽의 결합층을 $n_{sub} = n_m^2/n_E$ 의 조건이 성립하도록 각각 설계할 수 있다. 따라서 기본 대칭층과 결합층과의 등가 어드미턴스로부터 식 (4)와 같이 결합층의 조건을 일반화 시킬 수 있다.

$$n_m = \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2y} \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^8 n_L \quad (4)$$

식 (2)에 의하여 결정된 기본 대칭층의 거울층의 주기수(s-1)에 따라 결합층 거울의 주기수(y-1)도 식 (4)에 의하여 결정할 수 있다.

기본 대칭층과 결합층으로 설계된 필터는 비교적 삼각형 모양 이루고 있기 때문에 투과대역(-0.5 dB)과 격리를 만족시키기 위해서 기본 대칭층의 반복횟수(q)를 증가시키면, 필터는 투과대역(-0.5 dB)이 넓어지고 격리는 좋아지지만, 잔물결이 더욱 증가하게 된다. 이러한 잔물결은 그림 11과 같이 기본 대칭층과 결합층 사이의 등가 어드미턴스의 차이가 기준 파장을 벗어날수록 커지게 되므로 발생한다. 기본 대칭층의 A와 결합층의 A'은 기준파장이므로 등가 어드미턴스가 무반사 조건을 만족하도록 설계되었으나 기준파장에 인접한 투과대역에서의 B와 B', C와 C'은 기준 파장에서 멀어질수록 등가 어드미턴스 차가 커진다. 따라서 기본 대칭층과 결합층 사이에

넓은 분산곡선을 갖는 대칭층을 결합시킨다면 잔물결을 감소시킬 수 있다.^[11]

등가 어드미턴스의 분산은 그림 12에서와 같이 거울의 주기수(s-1)가 같은 경우 기준파장에서의 등가 어드미턴스는 같으나 간격층의 차수(m)가 작을수록 기본 대칭층의 등가 어드미턴스에 가까운 쪽으로 넓어지는 것을 볼 수 있다.^[12]

따라서 기본 대칭층과 결합층의 등가 어드미턴스 분산 사이에 투과대역에서 비교적 일정한 저차 대칭층 [nL (HL)^{s-1}H nL]을 삽입하면 잔물결을 줄일 수 있으며, 또한 이는 공동의 수를 증가시키므로 투과대역은 넓어지고 격리는 더욱 좋아진다. 앞서 설명한 기본 대칭층의 반복횟수(q)를 증가시키는 것도 공동의 수를 증가시키는 것과 같은 현상이므로 저차대칭층을 삽입한 후에 격리를 판단하여 반복횟수를 증가시키는 것도 가능하다. 삽입손실과 잔물결을 더욱 줄이기 위해서 최종 결합층으로 1/4 파장 광학 두께가 아닌 두께의 무반사 층을 넣으면 규격을 충분히 만족하는 필터를 설계할 수 있다. 따라서 등가 박막에 의한 최종 일반식은 식 (5)와 같으며, 표 6에 식 (5)를 이용한 일반식에 의한 설계절차와 계산식을 요약하였다.

$$\left[\text{공기} \mid \frac{(HL)^{y-1}H \ nL(HL)^{s-1}H \ nL \ [mL \ (HL)^{s-1}H \ mL]^q}{nL(HL)^{s-1}H \ nL \ (HL)^{y-1}H} \mid \text{기판} \right] \quad (5)$$

$$[y-1 / n-(s-1)-n / (m-(s-1)-m)^q / n-(s-1)-n / y-1]$$

표 6. 등가 박막에 의한 다중 공동 필터 설계 방법/절차

설계절차	일반식	계산식 / 방법	변수
1 기본대칭층	$[mL \ (HL)^{s-1}H \ mL]^q$	$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_0} = \frac{4}{m\pi} \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^s \frac{n_H - n_L}{n_H - n_L + n_L/m}$ $n_E = \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{s-1} n_H$	거울의 주기수(s) 간격층의 차수(m)
2 결합층	$(HL)^{y-1}H$	$n_m = \left(\frac{n_H}{n_L}\right)^{2y} \left(\frac{n_L}{n_H}\right)^8 n_L$	거울의 주기수(y)
3 격리	$[mL \ (HL)^{s-1}H \ mL]^q$	q값의 변화에 따른 격리와 투과대역 판단	반복횟수(q)
4 저차대칭층	$nL \ (HL)^{s-1}H \ nL$	넓은 분산관계를 갖는 대칭층 결합	간격층의 차수(n)
5 최종결합층	non-quarter wave AR	$Y = n_0$	필터의 어드미턴스(Y)

V. 등가 박막을 이용한 WDM 박막필터 설계

IV절에서 설명한 등가 박막을 이용한 다중 공동 필터의 설계 방법을 일반화시킨 표 6의 과정대로 100, 50, 25 GHz DWDM 박막필터와 CWDM 박막필터의 설계에 적용하였다. 기본 대칭층의 거울의 주기수는 $15 \leq s-1 \leq 21$ ($s-1$ 은 홀수)보다 작으며 대칭층의 차수는 $n < m$ 이므로 4이상으로 범위를 제한할 경우 (n (짝수) ≤ 10), 투과반치폭을 대략적으로 만족하는 기본 대칭층을 표 7와 같이 설계할 수 있다. 이후 설계과정은 50 GHz DWDM 박막필터를 대표로 설명할 것이다.

50 GHz DWDM 박막필터의 규격에 접근하는 기본 대칭층 $[6L(HL)^{19}H6L]$ 의 등가 어드미턴스는 식 (2)로부터 $n_E = 31.53$ 가 되며, 필터의 투과대역은 규격과 거의 비슷한 것을 그림 13에서 알 수 있다.

기본 대칭층으로부터 구해진 등가 어드미턴스(n_E)로부터 공기역과 기판쪽에 각각 무반사 조건이 되는 등가 어드미턴스(n_m)를 계산할 수 있으며, 식 (3)으로부터 결합층의 주기수 y 를 결정할 수 있다. 설계된 필터의 결합층의 설계를 표 8에 요약하였다. 표 8으로부터 기본 대칭층의 주기수($s-1$)가 홀수가 되면 공기쪽 결합층의 등가 어드미턴스와 잘 일치되고 짝수가 되면 기판쪽과 일치되어 기판쪽의 어드미턴스의 차로 반사손실이 생기게 된다. 이 손실은 기판 쪽에서 생긴 것이기 때문에 대칭층을 추가시켜서 개선할 수 없다. 따라서 기본 대칭층의 주기수는 항상 홀수로 해주어야 한다.

기본 대칭층과 결합층을 설계한 경우(그림 14의 $q=1$) 필터

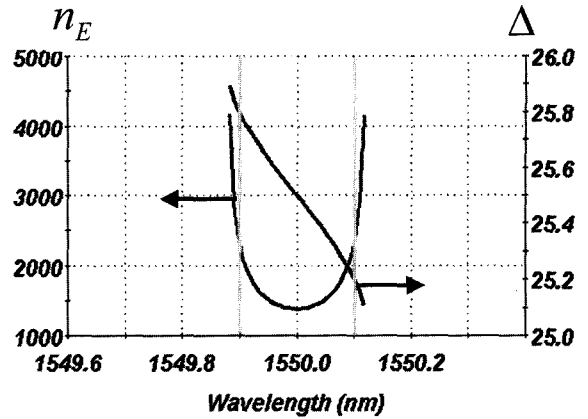


그림 13. 기본 대칭층 $[6L(HL)^{19}H6L]$ 의 등가 어드미턴스(n_E)와 등가 위상 두께(Gamma: Δ)

는 삼각형 모양이 되므로 이 경우 기본 대칭층의 반복횟수(c)를 증가시키면 그림 14($q=2, 3$)과 같이 격리가 좋아지고 투과대역이 넓어지는 것을 볼 수 있다.

그러나 투과대역이 규격을 만족하지 못하며 잔물결이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 경우 그림 10에서와 같이 넓은 분산을 갖는 저차 대칭층 $[2L(HL)^{19}H2L]$ 을 고차 기본 대칭층과 결합층 사이에 삽입하면 필터는 그림 15의 (1)와 같이 투과대역을 만족하고 잔물결과 삽입손실이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 최종 결합층으로 1/4 파장 광학 두께가 아닌 무반사 결

표 7. 100, 50, 25 GHz DWDM 박막필터의 기본 대칭층 설계

구분	투과반치폭(BW[nm])	가능한 변수(s, m, BW[nm])의 예	설계 예(임의 선택)
100 GHz	$0.45 \leq BW \leq 0.55$	(18, 6, 0.492)	$[6L(HL)^{17}H6L]$
50 GHz	$0.25 \leq BW \leq 0.35$	(18, 10, 0.334) (20, 4, 0.325) (20, 6, 0.25)	$[6L(HL)^{19}H6L]$
25 GHz	$0.1 \leq BW \leq 0.2$	(20, 8, 0.2) (20, 10, 0.168) (22, 4, 0.165) (22, 6, 0.125)	$[4L(HL)^{21}H4L]$

표 8. 결합층의 설계

[기본 대칭층] (등가 어드미턴스)	이상적인 결합층의 등가 어드미턴스	결합층(공기)		결합층(유리)		결합층 설계
		y	n_m	y	n_m	
$[6L(HL)^{17}H6L]$ (696.74)	공기쪽 = $\sqrt{696.74 \times 1} = 26.39$	7	22.72	8	32.00	$(HL)^7H$
	기판쪽 = $\sqrt{696.74 \times 1.5} = 32.32$					$(HL)^8H$
$[6L(HL)^{19}H6L]$ (1381.58)	공기쪽 = $\sqrt{1381.58 \times 1} = 37.16$	8	32.00	9	45.06	$(HL)^8H$
	기판쪽 = $\sqrt{1381.58 \times 1.5} = 45.52$					$(HL)^9H$
$[4L(HL)^{21}H4L]$ (2739.57)	공기쪽 = $\sqrt{2739.57 \times 1} = 52.85$	9	45.06	10	63.46	$(HL)^9H$
	기판쪽 = $\sqrt{2739.57 \times 1.5} = 64.10$					$(HL)^{10}H$
$[4L(HL)^{20}H4L]$ (1945.49)	공기쪽 = $\sqrt{1945.49 \times 1} = 44.1$	9	45.06	10	63.46	부적절
	기판쪽 = $\sqrt{1945.49 \times 1.5} = 54.02$					

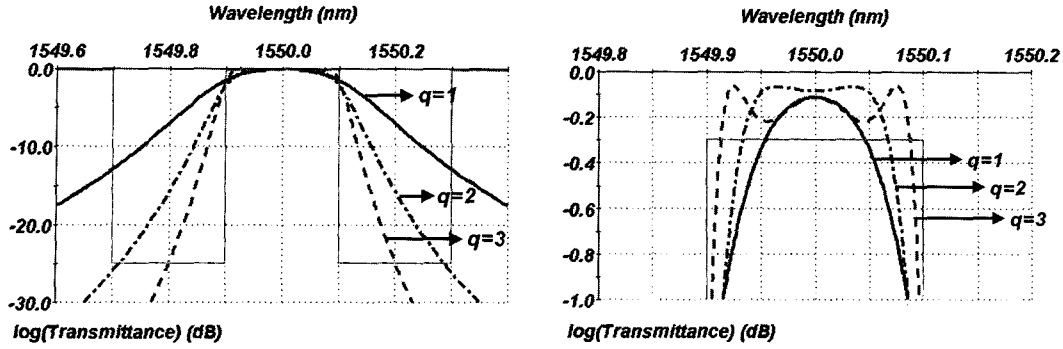


그림 14. 기본 대칭층의 반복횟수(q)에 의한 스펙트럼 변화.

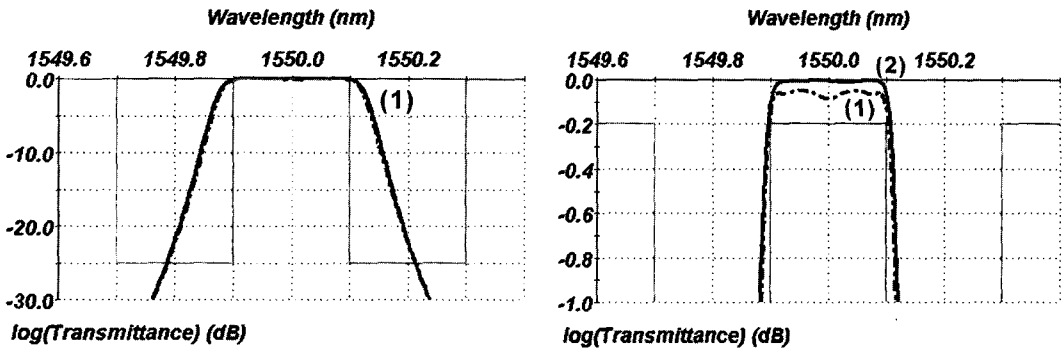


그림 15. 최종 설계(1)과 설계(1)에 무반사 층을 추가시킨 설계(2).

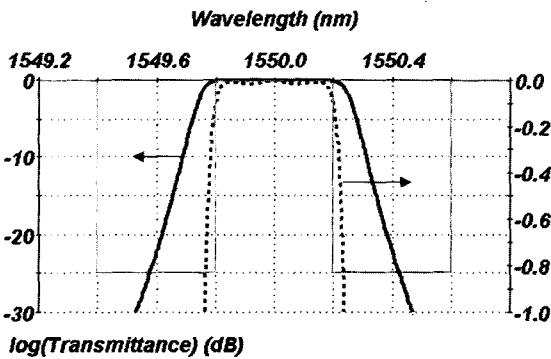


그림 16. 100 GHz DWDM 박막필터 설계의 특성.

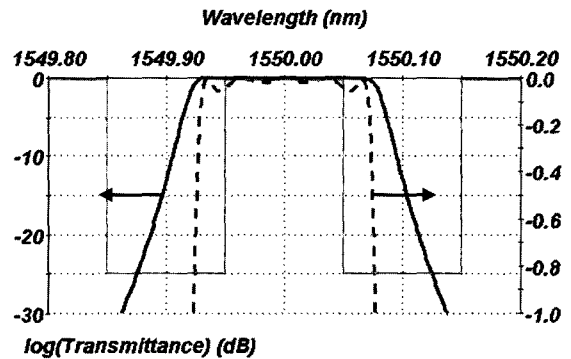


그림 17. 25 GHz DWDM 박막필터 설계의 특성.

을 삽입하면 그림 15의 (2)와 같이 잔물결과 삽입손실이 거의 없는 필터를 설계할 수 있다. 또한 지금까지의 등가 박막을 이용한 설계방법을 DWDM 및 CWDM 박막필터에 적용한 결과 표 9에서와 같이 모두 규격을 만족하는 필터를 설계할 수 있었으며, 각각의 WDM 박막필터 결과를 그림 16, 17, 18에 나타내었다.

VI. 다중 공동 구조에 의한 방법과 등가 박막을 이용한 방법 비교

다중 공동 구조에 의한 방법과 등가 박막을 이용한 방법을 비교하기 위해서 등가 박막을 이용한 방법으로 설계된 50 GHz DWDM 박막필터를 다중 공동 구조에 의한 방법으로

표 9. DWDM 및 CWDM 박막필터의 설계 예

설계	최종결합층	결합층	저차대칭층	기본대칭층	저차대칭층	결합층
100GHz	0.34H 1.47L	(HL) ⁷ H	2L (HL) ¹⁷ H 2L	[6L (HL) ¹⁷ H 6L] ²	6L (HL) ¹⁷ H 6L	(HL) ⁸ H
50GHz	0.34H 1.47L	(HL) ⁸ H	2L (HL) ¹⁹ H 2L	[6L (HL) ¹⁹ H 6L] ²	2L (HL) ¹⁹ H 2L	(HL) ⁹ H
25GHz	0.34H 1.47L	(HL) ⁹ H	2L (HL) ²¹ H 2L	[4L (HL) ²¹ H 4L] ²	2L (HL) ²¹ H 2L	(HL) ¹⁰ H
CWDM	1.58H 0.61L	(HL) ² H	2L (HL) ⁷ H 2L	[4L (HL) ⁷ H 4L] ⁵	2L (HL) ⁷ H 2L	(HL) ³ H

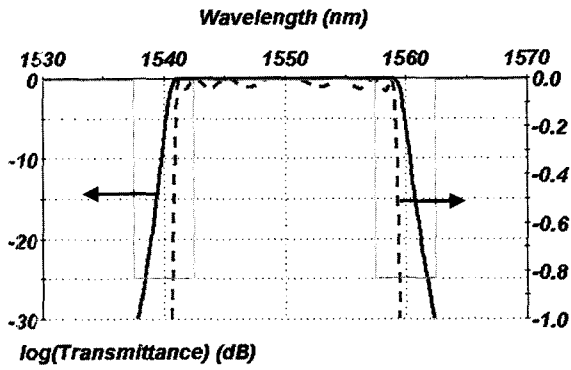


그림 18. CWDM 박막필터 설계의 특성.

이 식을 표현하면,

$$\begin{aligned} & \frac{(HL)^8 H^2 L (HL)^9 H^2 L [6L(HL)^9 H^6 L]^2 2L(HL)^9 H^2 L H(LH)^9}{= (HL)^8 H^2 L H(LH)^9 L(HL)^9 H^2 L 6L H(LH)^9 L(HL)^9 H^6 L 6L} \\ & \frac{H(LH)^9 L(HL)^9 H^6 L 2L H(LH)^9 L(HL)^9 H^2 L H(LH)^9}{= (HL)^8 H^2 L H(LH)^9 L(HL)^9 H^8 L H(LH)^9 L(HL)^9 H^2 L} \\ & \frac{H(LH)^9 L(HL)^9 H^8 L H(LH)^9 L(HL)^9 H^2 L H(LH)^9}{[8-2-9/9-8-9/9-12-9/9-8-9/9-2-9]} \end{aligned}$$

같이 5중 공동 필터가 되고, 각 공동에서의 거울의 주기수나 공기쪽 거울의 주기수가 한 차수 작고 모두 같으며, 또한 간격층의 차수는 [2-8-12-8-2]와 같이 중심부분의 간격층의 차수가 높고 양옆으로 점차 줄어드는 대칭구조임을 알 수 있다. 이러한 구조는 기본 대칭층의 반복횟수(q)가 2인 경우로 5중 공동 필터와 같으며, q값이 증가함에 따라 기본 대칭층에 있는 간격층의 차수(m)가 중복되기 때문에(6L, 6L), 가운데 공동에서의 간격층의 차수가 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 등가 박막을 이용한 방법은 공기 쪽을 제외한 모든 거울의 주기수가 같고 간격층의 차수는 가운데 공동에서 가장 크고 양옆으로 작은 경우로 제한되므로 설계의 수가 비교적 작은 편이다. 두 방법 모두 층수를 줄이기 위해서는 거울의 주기수를 크게 하고 간격층의 차수를 증가시키면 층수가 적은 설계가 가

능하나, 등가 박막을 이용한 방법이 비교적 층수가 많은 경향이 있다.

지금까지 설명한 다중 공동 구조에 의한 방법과 등가 박막을 이용한 방법의 특징을 비교하여 표 10에 요약하였다. 다중 공동 구조에 의한 방법은 각각의 변수들을 적절히 변화시켜 규격을 만족하도록 접근해가지만, 등가 박막을 이용한 방법은 특성을 나타내는 수식을 이용하여 대략적으로 규격을 만족하는 초기설계로부터 시작하여 체계적으로 WDM 박막필터를 설계할 수 있다.

VII. 결 론

유전체 다층박막을 이용하여 광통신용 WDM 박막필터를 다중 공동 구조에 의한 방법과 등가 박막을 이용한 방법으로 설계하고 특징을 비교하였다. 직사각형 모양에 가까운 WDM 박막필터를 설계하기 위해 공동의 수를 증가시켜야 하며, 공동의 수를 증가시킬수록 필터의 특징을 결정짓는 변수(공동의 수, 거울층의 주기수, 간격층의 차수)가 기하급수적으로 늘어남에 따라 설계시 많은 어려움이 발생한다. 증가되는 변수를 감소시키기 위해 대칭적으로 변수들을 변화시켜본 결과 여러 가지 필터의 특성을 찾을 수 있었고, 다양한 필터의 특성으로부터 WDM 박막필터에 적용할 수 있는 필요조건을 제시하였다. 그러나 대칭적으로 변수를 변화시켜도 설계하는데 있어 적지 않은 시행착오를 겪어야 하며, 변수에 따른 필터의 특성을 예측하기 어려운 점이 있다. 이런 문제점을 해결하기 위해 대칭 구조의 박막을 일층의 등가 박막으로 해석하여 변수를 최소화할 수 있었고 각각의 등가 박막을 다중 공동 필터의 분석이론을 이용하여 일반적인 구조로 표현하고, 각각의 구조에 대응되는 수학적인 계산식에 의하여 순차적으로 설계한 결과 다중 공동 필터에 의한 방법보다 체계적이고 정량적으로 WDM 박막필터를 설계할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 산업자원부와 정보통신부에서 지원하

표 10 다중 공동 필터에 의한 방법과 등가 박막을 이용한 방법 비교

구 분	다중 공동 필터에 의한 방법	등가 박막을 이용한 방법
구조	4-cavity A-B-C/D-E-F/G-H-I/J-K-L 5-cavity A-B-C/D-E-F/G-H-I/J-K-L/M-N-O	q=1 q=2
변수	모든 거울의 주기수와 간격층의 차수(A, B, C, ...)	y, s, m, n, q (5개, 공동의 수와 무관) m > n, n, m = 짝수, s-1 = 홀수
설계 방법	변수들을 적절히 변화시켜 설계(정성적)	일반식에 대응되는 계산식에 의해 설계(정량적)
특징	장점 · 비교적 많은 설계 가능 · 층수를 감소시킬 수 있음 단점 · 많은 변수로 필터의 특성 예측 어려움 · 많은 시간 소요(시행착오 과정 반복) · 최적화된 설계 선택의 어려움	· 정량적인 설계 가능(수학적 접근 용이) · 스펙트럼 없이도 필터의 특성 예측가능(건물결, 투과대역, 삽입손실) · 변수(s, m)에 따라 기타변수(y, n)값 고정 · 시행착오 과정이 거의 없음 · 일반화된 설계과정으로 설계시간 감소 · 설계 개수가 비교적 적음 · 층수가 비교적 증가

유망전자부품기술개발사업(Electro-0580사업)의 연구비 지원으로 수행 되었습니다.

참고문헌

[1] S. V. Kartalopoulos, *Introduction to DWDM Technology* (SPIE Press and IEEE Press, New York, 2000).

[2] R. Faber, K. Zhang, and A. Zoeller, "Design and manufacturing of WDM narrow band interference filters," *Proc SPIE 4094*, 58-64 (2000).

[3] H. Takashashi, "Temperature stability of thin film narrow-band pass filters produced by ion assisted deposition," *Applied Optics*, Vol. 34, 667(1995).

[4] N. A. O'Brien, M. J. Cumbo, K. D. Hendrix, R. B. Sargent, and M. K. Tilsch, "Recent Advances in Thin Films Interference Filters for Telecommunications" in 44th Annual Technical conference Proc., SVC, Philadelphia, USA.

[5] R. R. Willey "Achieving narrow bandpass filters which meet the requirements for DWDM," *Thin Solid Films* 398-399 (2001).

[6] 황보창권, 박막광학(다성, 서울, 2001)

[7] James Campbell, "Coarse WDM makes waves in metro/access markets," WDM solution November, 2000.

[8] Fang Li, Youngchang Lin, "Design of Optical Interference Filter for DWDM," *Proc SPIE 4581*, 384-389(2001).

[9] A Thelen, *Design of Optical Interference Coatings* (McGraw-Hill, New York, 1989).

[10] P. Baumeister, "Bandpass Filter for wavelength division multiplexing modification of spectral bandwidth," *Appl. Opt.* 37, 6609-6614(1998).

[11] H. A. Macleod, *Thin-film Optical Filters*, 3rd ed. (Macmillan, New York, 2001)

[12] H. A. Macleod. "Coatings for wavelength division multiplexing" in 45th Annual Technical conference Proc., SVC, Orlando, FL, USA.

Designs of WDM thin film filters for fiber optical communication using an equivalent thin film technique

Nam-Seok Oh, Sang-Hyun Lee, and Chang-Kwon Hwangbo[†]

Inha Univ., Dept. of Physics, 253 Younghyun-dong, Nam-gu, Incheon 402-751, KOREA

[†]E-mail: hwangho@inha.ac.kr

Hwoe-kyung Kim, Myung-Jin Kim, and Young-Min Im

*Korea Electric Technology Institute, Optical Telecommunication Research Center
455-6 Masan-ri, Jinwi-myon, Pyungtaek-si, Kyunggi-do 451-865, KOREA*

(Received July 22, 2003, Revised manuscript October 2, 2003)

WDM thin film filters for fiber optical communication were designed using Fabry-Prot type multiple cavity filters and an equivalent thin film technique. As the number of cavities in multiple cavity filters increases, it becomes difficult to design the filters due to a great number of variables (the number of cavities, period of reflectors, order of spacers). To solve the problem of design, we treated the fewest variables, regarding symmetrical thin films as equivalent layers, and we applied structural and numerical formulas based on an analysis method of multiple cavity filters. The equivalent thin film technique was able to provide systematic and quantitative design of the WDM thin film filters.

OCIS Codes : 310.1620, 310.6860, 060.2330, 060.4230, 060.4510.