



전자부품종합기술연구소 수동광부품 연구 개발 현황

이한영 · 김성구 · 김명진 · 윤형도 · 신동호 · 임영민 · 윤대원

전자부품종합기술연구소 부품연구1팀

1. 개요

전자부품종합기술연구소는 부품 연구 본부와 시스템 연구 본부로 나뉘어져 있으며 광통신용 소자는 부품 연구 본부내의 부품 연구 1팀이 담당하고 있다. 본 연구실에서는 수동광 소자를 주로 하여 연구 개발하고 있으며 광소자의 종류에 따라 LiNbO₃를 이용하는 광도파로 소자, 광섬유를 이용하는 광섬유 소자, 그리고 박막형 소자로 대별된다. LiNbO₃에 Ti를 확산시켜 만든 도파로에 LiNbO₃의 전기광학 효과를 이용해 얻어지는 소자로 광강도 변조기, 광위상 변조기, 음향광학 가변광 필터 등이 있으며, 표준 또는 특수 광섬유를 응용하여 연구 개발된 소자로는 1×N 커플러, 편심 광섬유 가변광 감쇠기 등이 있다. 박막 간섭형 가변광 필터, WDM용 필터는 유전율이 서로 다른 박막을 겹으로 적층시켜 얻어지고 있다. 이외에도 고정형 광필터, 광커넥터, 광콜리메이터, ONU(Optical Network Unit) 등이 개발되었으며 대부분의 연구 개발물은 광전문 기업에 기술 이전되었거나 현재 이전 진행중이다. 그 밖에도 광섬유 격자를 이용한 소자, 광섬유레이저/복합광 변조기에 의한 다채널 광송신 모듈, DWDM용 협대역 필터, 광패키징, 광네트워크 시뮬레이터 개발 등이 현재 활발하게 연구되어지고 있다.

2. 광도파로 소자

2.1 광강도변조기 (Optical Intensity Modulator)

미래의 정보화 사회에서 고속, 대용량 전송요구에 효과적으로 대처하기 위한 방법의 하나로 광통신 시스템에 대한 연구가 국내외적으로 활발하다. 특히 광통신 시스템이 지닌 고속, 광대역성을 유효 적절하게 이용하기 위해 전송능력을 증가시키는 연구가 진행중이며, 광변조기는 고속, 광대역 광통신 시스템을 구축하는데 매우 중요한 위치를 차지하고 있다. 특히 광변조기 구현을 위한 기반기술로서 반도체공정 기술과 마이크로 웨이브 소자 설계기술 등의 첨단 기초기술 등이 요구되기 때문에 기술적 파급효과와 장래 가능성의 관점으로 볼 때 그

중요성이 강조되고 있다. 외부 광변조기를 구현하기 위해 대표적으로 사용되는 LiNbO₃ 기판은 우수한 전기광학 특성과 저손실 단일모드 광도파로 구현이 용이하여 가장 폭넓게 이용되고 있다. 이 광도파로는 기판보다 높은 굴절률을 갖는 영역을 평면 혹은 채널형태로 만들어 빛의 전반사 원리에 따라서 높은 굴절률 영역에 빛이 도파되게 하는 구조이다. LiNbO₃ 결정은 단축결정(uniaxial crystal)으로 1550 nm 파장에서 이상광 굴절률(extraordinary refractive index: n_e)이 2.138이고, 정상광 굴절률(ordinary refractive index: n_o)이 2.211으로서 큰 복굴절을 갖는 강유전체이다. 그리고 변조기 광대역 특성을 얻기 위한 방법으로 전극두께 및 버퍼층을 두껍게 형성시켜 CPW 형 변조기에 적용하여 광변조기 내부칩을 제작하게 된다.

본 연구에서는 제작공정 및 특성 평가를 거치면서 더 많은 수율과 저전압 구동을 고려한 전극구조에 맞도록 광도파로의 설계를 수행하였으며, 그림 1~그림 5에 광변조기 제작에 관한 구조, 공정도 및 사진 등을 나타내었다. Mach-Zehnder 간섭기의 선폭은 7 또는 8 μm 이고 간격은 13 또는 12 μm 이다. 광변조기 시작품은 입력측에 PMF를 붙이고 출력측에 SMF를 붙여 측정하였다.

표 1에는 제작된 광변조기의 성능지수를 요약하였다. 삽입 손실은 2.6~6 dB 이내에 모두 존재하였고, 소광비는 23~32 dB였으며 구동전압은 5.5~7.1V로 측정되었다. 그리고 전기광

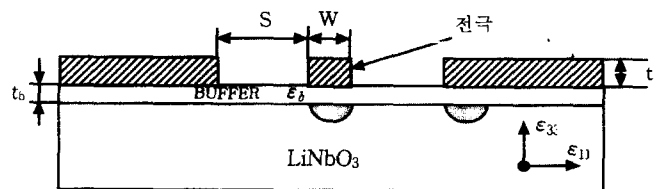


그림 1. CPW 전극구조의 광변조기 단면.

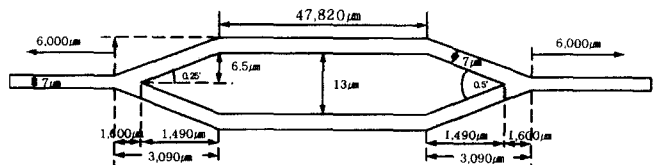


그림 2. Mach-Zehnder 간섭기 도파로 구조.

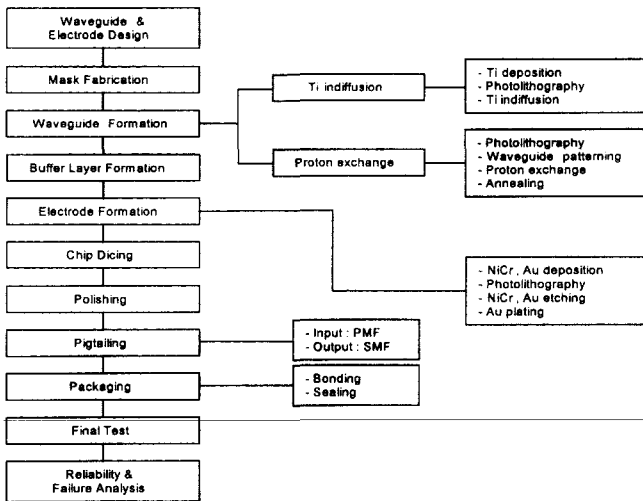


그림 3. 광변조기 제작공정.

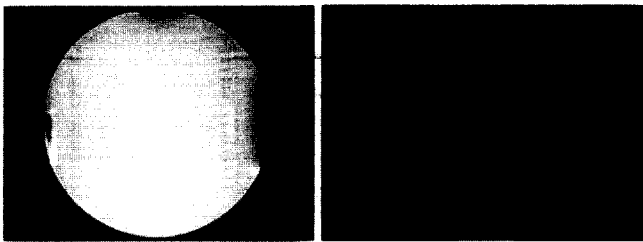


그림 4. 3" LiNbO₃ 웨이퍼위에 제작된 도파로(왼쪽) 및 광변조기(오른쪽).

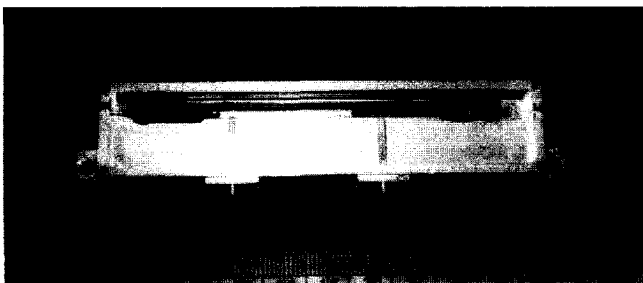


그림 5. 광변조기 시작품 내부 사진.

학변조대역폭인 -3 dB optical response는 6~8 GHz(그림 6)를 나타내고 있어 제작된 광변조기는 10 Gb/s급 광전송시스템에 실장하여 사용할 수 있음을 확인하였다.

그림 7은 제작된 광변조기에 10 Gbps로 동작시켰을 때 eye 패턴을 나타내고 있다. 펄스패턴발생기에서 PRBS(Pseudo-ran-

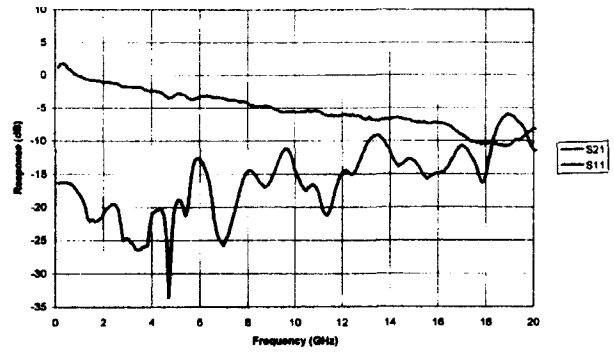


그림 6. 광변조기 광변조특성(S₂₁).

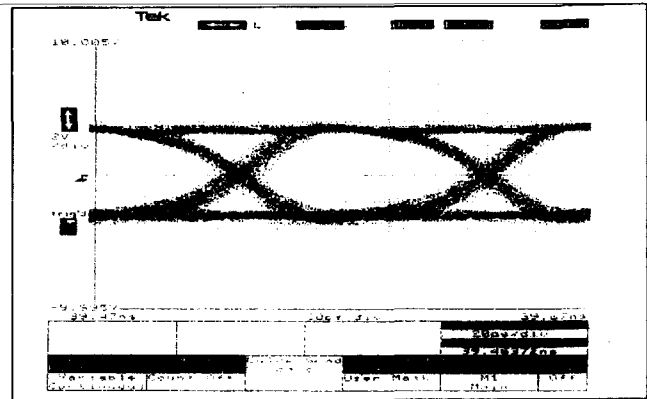


그림 7. 광변조기의 Eye Diagram.

dom bit sequence) 2⁷-1 로 동작시켜 인가시키고 광변조기 출력 단자로 변조된 광원을 EDFA 로 증폭시켜 eye 패턴을 조사한 것이다.

2.2 광위상변조기 (Optical Phase Modulator)

본 연구에서는 궁극적으로 LiNbO₃ 저손실 광도파로와 진행 파형 전극구조를 이용하여, 5 Gbps 이상의 변조대역을 갖는 광 위상변조기를 제작한 다음, 광전송 시스템에 쉽게 활용될 수 있도록 패키지화하여 고부가가치형 상품으로 유도하고자 한다. 이를 위해 두꺼운 전극과 SiO₂ 버퍼층을 사용한 광대역 구조로 설계하였고 공정 면에서는 저손실 광도파로 및 광대역 전극의 재현성 있는 제작을 위한 단위공정들을 확립하였으며, 특히 상품화에 따른 경제성 문제를 고려하여 웨이퍼 중심의 공정

표 1. 광변조기 성능지수비교

Parameter	KIM5102				KIM5104			
	2550-2-A	2550-2-C	2550-2-E	2550-2-F	3200-2-C	3200-1-D	3200-1-B	3200-2-D
Insertion Loss [dB]	3.1	3.2	2.6	3.4	5.8	5.2	4.2	5.2
Extinction Ratio [dB]	32	32	23	28	27	29	29	30
V _π [V]	6.3	6.3	7.1	6.5	5.5	6.0	5.5	5.5
S ₂₁ [GHz]	~9	~9	~8.5	~8.5	~6	~7	~7	~7
S ₁₁ [dB]	~12	~14	~15	~13	~17	~16	~15	~15

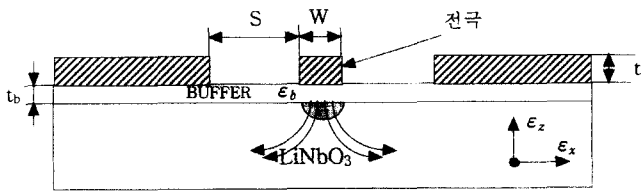


그림 8. CPW 전극구조의 위상변조기 단면.

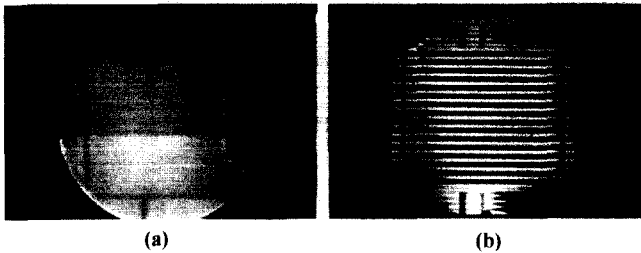


그림 9. 웨이퍼 설계 및 사진.

확립을 추구하였다.

기판은 3인치 Z-cut LiNbO₃ 기판을 사용하였고, 기판위에 Ti 광도파로를 설계하여 사진식각공정으로 패터닝하였다. 세부 도파로 폭은 7과 8 μm를 채용하였다. 그리고 포토마스크에 마크젠다 간섭형 및 단일채널 도파로를 각각 설계하여 광파장 1.55 μm에서 단일 모드조건을 실험하였다. 패터닝 작업은 전자빔 증착기로 800-1500Å로 증착하여 두께 측정기로 측정 후 공정에 사용하였다.

그림 8~그림 11는 광위상변조기를 제작하기 위한 단면구조, 웨이퍼사진, 확산로 및 패키지 사진을 나타내었다. 그림 12는 모드가 출사된 끝점에서 40배렌즈로 확대하고 비디콘으로 측정된 광전력을 도파손실로 환산한 값이다. 도파로 전송손실은 Fresnel 손실을 제거하고 파장 1550 nm에서 0.3~0.8 dB/cm로 계산되었다.

그림 13에 소자의 전극 마이크로파 특성 S₁₁ 및 변조특성을 나타내었다. 버퍼층 두께를 조절함으로써 스트립 임피던스를 50Ω에 맞춘 결과 대역 10 GHz까지 -10 dB 이하를 유지하는 양호함을 나타내었으며 변조대역폭은 6 GHz로 측정되었다.

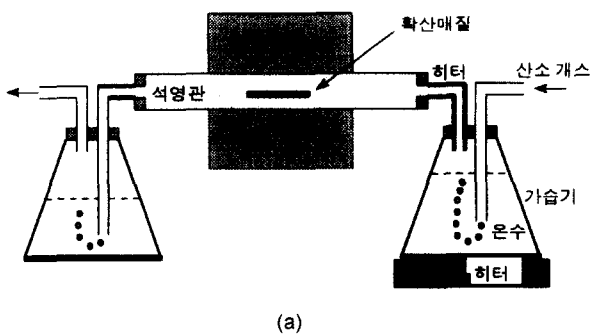


그림 10. 확산로 및 그래프.

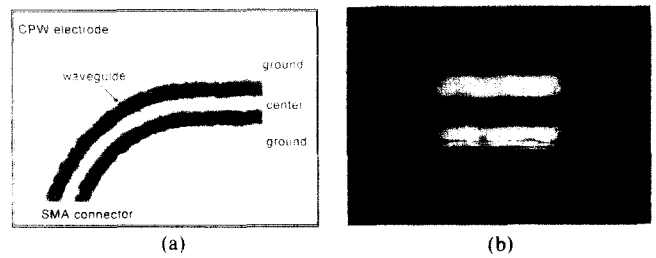


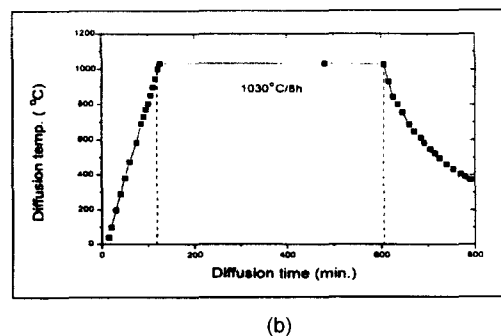
그림 11. 도금사진 및 패키지 사진.

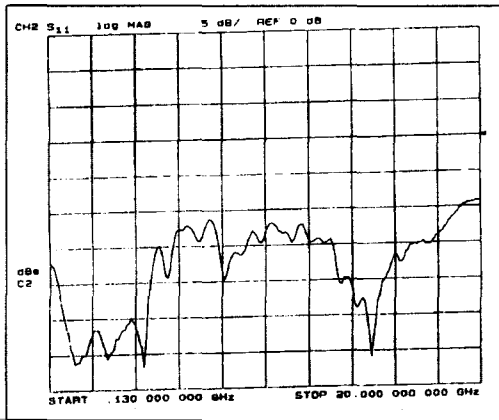


그림 12. 도파로 도파모드, 7 μm.

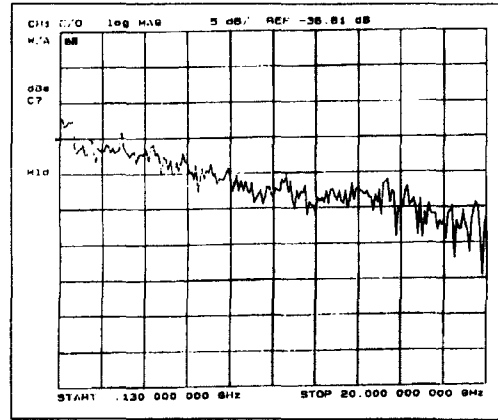
2.3 음향광학 가변 광필터(AOTF, Acousto-Optic Tunable Filter)

그림 14는 AOTF의 기본적인 구조를 나타내고 있다. 광대역 파장대를 광원이 TE 편광기를 통하여 TE 모드가 입사되면 광은 X-cut LiNbO₃ 기판에 내부확산된 Ti:LiNbO₃ 채널 광도파로를 따라 진행한다. Filtering하고자 하는 파장에 대응하는 RF를 SAW IDT 전극에 인가하여 SAW를 발생시키면 SAW가 전파되는 영역에 광탄성효과 및 전기광학효과에 의해서 도파로 및 기판의 굴절률을 변화시킨다. TE 모드로 입사된 광은 SAW에 의해 생성된 굴절률 변조영역을 만나면서 X-cut LiNbO₃ 기판의 복굴절 타원체로 인한 주축이 회전하게 되어, 원하는 한 파장만이 TM모드로 변환되고 원치 않는 나머지 파장대에 대해서는 TE 모드를 그대로 유지한다. 출력단에서는 TM 모드의 원하는 한 파장과 TE 모드의 원하지 않은 수많은 파장대의 광이 출력된다. 최종적으로 TM 편광기를 사용하여 여파된 파장을 얻는다.





(a) pm-1



(b) pm-2

그림 13. PIN PD의 단면도.

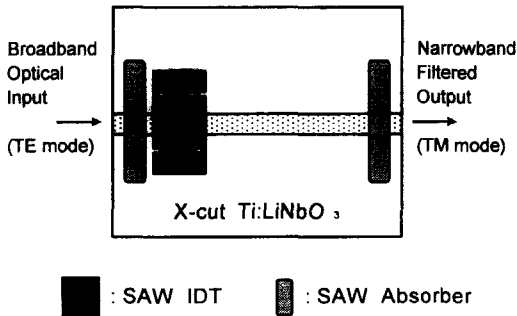
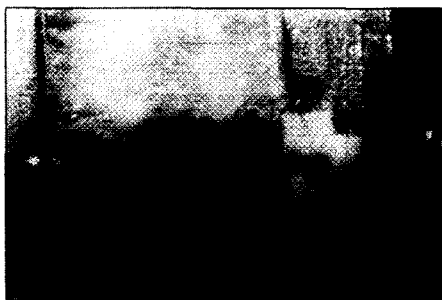
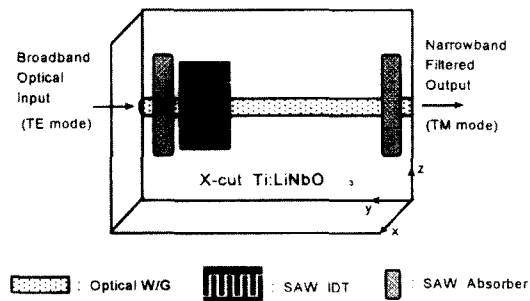


그림 14. AOTF의 기본구조.

본 연구에서는 광도파로, IDT 전극 및 AOTF를 제작하고 제반특성을 분석하였다. 광도파로 제작은 Ti:LiNbO₃ 내부확산방식을 사용하였으며 제작후 각파장대에서 단일모드조건을 만족하는지를 확인하기 위해 도파실험 및 손실을 측정하였다. SAW IDT 전극에는 Au를 증착, 에칭하고 network analyzer로 전극 S-parameter 특성 및 임피던스 특성을 분석하였고 소자를 패키징하고 AOTF 소자 동작 특성을 실험 (그림 15)하고 논의하였다.



(a)



(b)

그림 15. 전극 분당 및 측정방법.

그림 16은 1550 nm 파장에서 편광에 따른 Ti:LiNbO₃ 광도파로 near-field pattern을 관측한 것이다. 분석결과 TE, TM 모드 모두 양호하게 전파됨을 확인하였다. 이 도파로 전파손실은 0.6 dB/cm 이하로 나타났다.

제작된 시편의 전극특성을 알아보기 위해서(그림 17) 시편을 일정한 크기로 절단하여 전극 테스트용 패키지에 부착시켰다. 전극의 패드부분과 패키지에 연결되어있는 SMA 컨넥터 사이를 gold wire bonding이나 silver paste로 부착시켰다. 회로망분석기를 이용하여 제작된 표본전극의 S₁₁ 반사특성과 Smith chart로 임피던스 특성, S₂₁ 전달특성 등을 관찰하였다. S₁₁ 반사특성은 IDT 전극자체의 전기적인 특성으로써 IDT 전극에 RF를 인가하였을 때 얼마만큼의 양이 SAW로 변환될수 있는가를 짐작하기 위해서 측정한다.

그림 18은 RF 주파수 $f_s=172-177.45$ MHz일 때 λ [nm]가 여파되는 동조특성을 알아본 것으로 sidelobe level이 -10 dB 이하로 측정되었다. 표 2에 제작된 소자의 전제소자특성을 요약하여 나타내었으며 표 2에서와 같이 변환효율은 97%, 사이드 로브 수준은 8 dB, FWHM은 1.5 nm로 측정되었다.

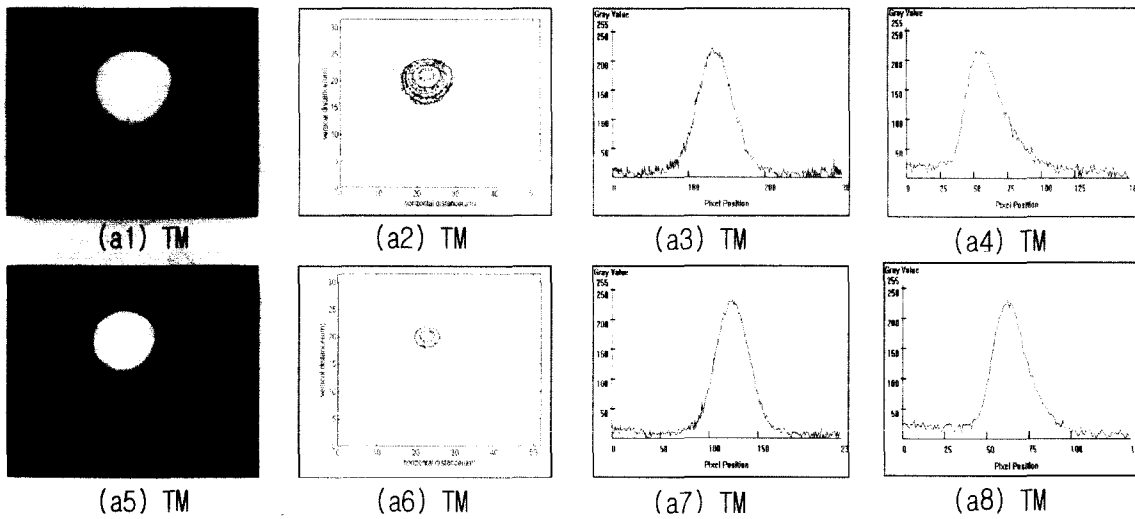


그림 16. 근거리패턴.

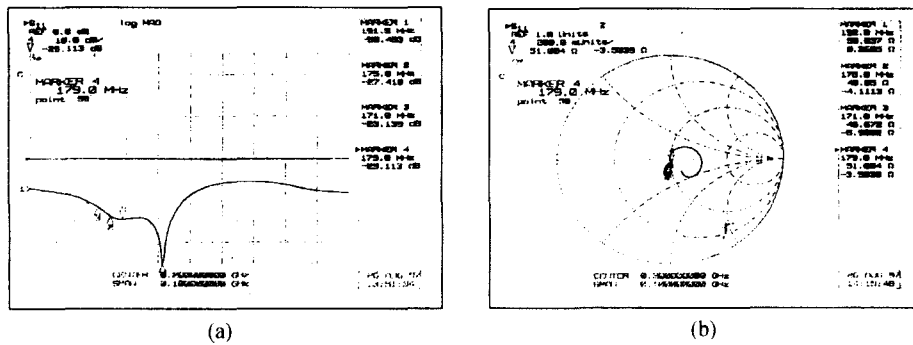


그림 17. 주파수에 따른 전극특성 (a) S_{11} , (b) 임피던스 ($W_s=5 \text{ mm}$, $N=10$, $T_c=1600 \text{ \AA}$).

3. 광섬유 소자

3.1 편심 광섬유를 이용한 가변광감쇠기

3.1.1 개요

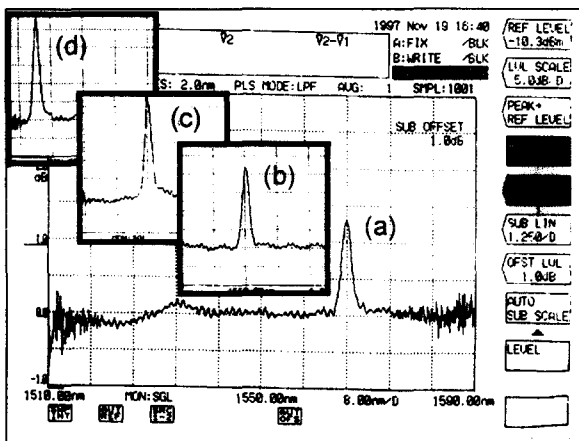


그림 18. 주파수 가변에 따른 파장 동조특성 ($P_s=23 \text{ dBm}$, $L=2.3 \text{ cm}$). (a) $f_s=172.0 \text{ MHz}$, $\lambda=1566 \text{ nm}$, (b) $f_s=174.0 \text{ MHz}$, $\lambda=1550 \text{ nm}$, (c) $f_s=176.0 \text{ MHz}$, $\lambda=1534 \text{ nm}$, (d) $f_s=177.5 \text{ MHz}$, $\lambda=1524 \text{ nm}$

광감쇠기는 입사한 광의 강도에 대해 일정량의 광손실을 부여하여 감쇠된 광을 출력하는 부품으로서, 주로 수신부의 수광 소자에 입사하는 광강도를 최적의 값으로 조정하기 위한 부품으로 광송신망이나 광계측기 등에 폭넓게 사용되는 주요 광부품이다.

미주, 일본, 유럽을 중심으로 기술개발이 진행되어온 광감쇠

표 2. 소자동작특성

특성 파라미터	측 정 값	
Sidelobe Level	-8dB	
Mode Conversion Efficiency	97%	
RF Input Power	29dBm	
FWHM	1.5nm	
Tuning Rate	8.2nm/MHz	
Tuning Range	65nm	
Interaction Length	1.3cm	
제작 조건	Waveguide	$w=8 \mu\text{m}$, $\tau=1200 \text{ \AA}$ $T=1050^\circ\text{C}$, $t=8\text{h}$, wet O_2
	Electrode	$W_s=1.39 \text{ mm}$, $L_s=21.2 \mu\text{m}$, $N=20$, $T_c=2000 \text{ \AA}$

기는 2000년대 광부품 수요의 폭발적인 증가에 대비해 다양한 기능의 신제품 개발이 이루어져 왔다. 소자의 개발은 특성의 편광 무의존화, back reflection의 최소화, 경량화, 소형화 및 저가격화로 방향 지워지고 있다.

광섬유 가변광감쇠기의 원리는 편심 코어를 가지는 두 광섬유를 광섬유 축을 중심으로 회전시켜 코어의 중첩을 조절함으로써 투과되는 광 파워의 양을 가변시키는 것이다. 광섬유의 회전은 두 광섬유 사이의 편심(offset) 정도를 변화시키게 되어 한 쪽 광섬유 코어에서 다른 쪽 광섬유 코어로 전송되는 광 파워의 크기를 가변시킬 수가 있다. 광섬유 끝단면에 경사를 줌으로써 반사에 의한 신호의 간섭을 줄일 수 있다.

3.1.2 코어의 편심에 따른 전송 손실

그림 19에 개념적으로 제시된 가변광감쇠기의 편심 코어 광섬유에서의 전송 손실을 구하기 위하여 그림 20과 같이 두 광섬유의 접촉 단면을 고려하였다. 그림은 두 편심 코어 광섬유가 동일 축, C를 가지고 있으며 축으로 부터의 거리가 d임을 나타낸다.

각 편심 코어 광섬유의 코어 중심에서 공통축 C로 부터의 거리가 d이고, 축을 중심으로 한 두 코어 사이의 회전각이 θ 일 때, 두 코어의 축간 간격 s는

$$s = 2d \sin(\theta/2) \quad (1)$$

$\theta=0$ 일 경우 $s=0$, $\theta=\pi$ 일 경우 $s=2d$ 가 된다.

입력단 코어의 기본 모드가 출력단 코어의 동일 기본 모드를 exciting 시킬 때 발생하는 전송 손실은 두 코어간의 overlap integral을 계산하여 얻을 수가 있다.

$$a_o = a_i \frac{\int_{A_\infty} \Psi_i \Psi_o dx dy}{\int_{A_\infty} \{\Psi_o\}^2 dx dy} \quad (2)$$

위 식에서 A_∞ 은 광섬유의 단면이 무한대임을 나타낸다.

모드의 파워는 광섬유의 전체 단면에 걸쳐 $\Psi(x, y)^2$ 에 비례하므로 식 (2)으로부터 입사 파워에 대한 투과 파워의 비는 다

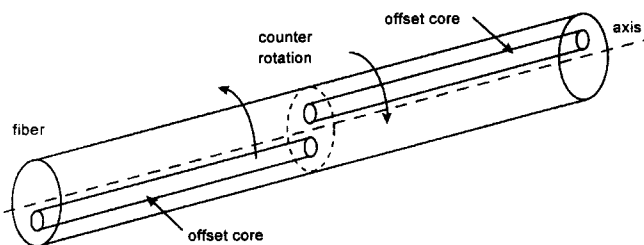


그림 19. 단일 모드 광섬유 가변광감쇠기의 가변 원리를 보여주는 개략도.

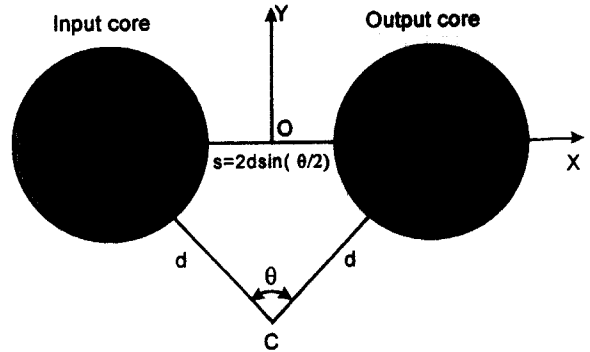


그림 20. 입, 출력 편심 코어 광섬유의 코어 편심.

음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{P_t}{P_i} = \frac{\left\{ \int_{A_\infty} \Psi_i \Psi_o dx dy \right\}^2}{\int_{A_\infty} \{\Psi_i\}^2 dx dy \int_{A_\infty} \{\Psi_o\}^2 dx dy} \quad (3)$$

dB로 표현된 파워 손실은

$$-10 \log_{10} \left\{ \frac{P_t}{P_i} \right\} \quad (4)$$

그림 21의 1200 nm~1700 nm 파장에서의 파워 손실이 앞의 그림 20에서 정의된 코어 간격 s에 대한 함수로 나타나 있다. 굴절을 프로파일로 상관없이 파워 손실은 코어 간격에 대해 같은 경향의 변화를 보임을 알 수 있다. 예로서, 주어진 코어 간격 s에 대하여 손실은 파장이 짧아짐에 따라 증가한다. 물리적으로 말해서 파장이 짧아짐에 따라 기본 모드가 코어에 더욱 구속되어지며, 따라서 분리된 두 코어의 중첩은 감소한다고 말

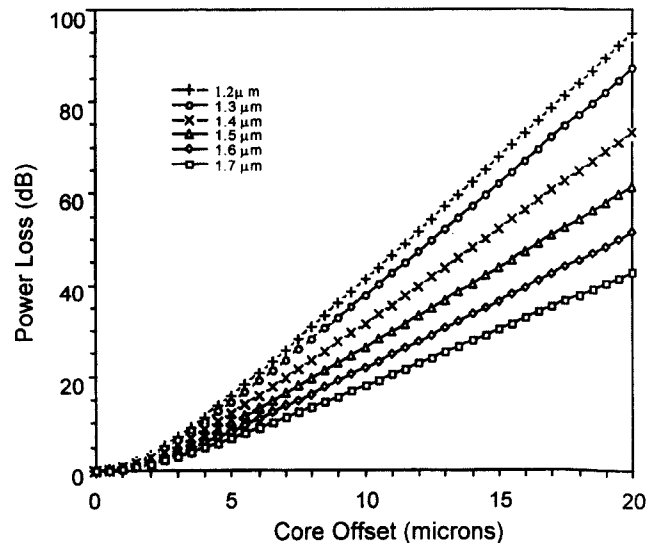


그림 21. 다른 파장에서 core offset에 따른 광손실.

할 수 있다. 그림 3에서 광섬유 코어축이 20 μm 이상 떨어져 있을 때 30 dB 이상의 손실이 발생된다. 광섬유 편심 d로 말하면, 편심이 최소 10 μm 일 때 코어간 최대 간격은 $\theta=\pi$ 일 때 20 μm 가 된다.

편심 파워 손실을 실험적으로 정량화하기 위하여, translation stage에 고정된 광섬유를 x 또는 y 방향으로 움직이며 lateral offset에 의한 손실을 측정하였다. 실험은 스탠다드 광섬유와 10 μm 의 편심을 가지는 광섬유 각각에 대해 행하여졌다. 먼저 입, 출력단 광섬유의 코어를 정렬시킨 다음 x-y positioning stage를 이용하여 입력 또는 출력단 광섬유를 광섬유 단면에 평행하게 서서히 이동시키며 투과되는 파워를 측정하였다.

입, 출력단 광섬유에서 기본 모드가 가우시안 분포를 가진다면 출력단 광섬유로 전송되는 파워비는

$$\frac{P_t}{P_i} = \exp\left\{-\frac{s^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (5)$$

여기에서 σ 는 기본 모드의 스폿 크기 (fundamental mode spot size)이고 s는 식 (1)에서 정의된 코어축 간의 간격이다. 위 식을 dB로 표시하면

$$-10 \log\left\{\frac{P_t}{P_i}\right\} = 2.17 \frac{s^2}{\sigma^2} \quad (6)$$

달리 말해서, 기본 모드가 정확하게 가우시안일 때, dB로 표현된 손실은 편심의 이차함수로 표현된다. 그림 2에 보여진 곡선은 위의 식과 일치하여 이차함수 특성을 알 수 있다.

제작할 광섬유 코어의 편심을 결정하기 위하여 두 광섬유 코어의 offset (lateral separation)에 따른 광손실을 시뮬레이션한 결과, 약 14 μm 의 core offset에 의해 30dB 이상의 광감쇠가 일어남을 알 수 있었다(그림 21). 위의 이론적 접근에 의해 제작된 편심 광섬유의 제반 특성 및 굴절율 프로파일은 각각 표 3과 그림 22에 나타나 있다.

이리하여 제작된 편심 코어 가변광감쇠기의 조립도 및 패키지 사진이 그림 23에 나타나 있다. 그림 24는 편심코어 광섬유의 회전에 따른 가변광감쇠기의 감쇠량을 회전각의 함수로 보여준다. 광섬유의 회전에 의해 두 광섬유간의 상태 변화는 코어간의 transverse 간격과 longitudinal 거리의 변화, 그리고 두 광섬유 끝면간의 면각도(예를 들어 평행 상태에서는 0°, 반대 방향에서는 각 페룰이 8°로 연마되었기 때문에 16°)의 변화이다.

제작된 가변광감쇠기의 파장 의존성을 1250 nm~1600 nm

표 3. 250 μm 의 편심 코어 광섬유의 제반 특성

measurement	result
cladding diameter	125.90 μm
core diameter	7.50 μm
outer coat diameter	254.36 μm
core offset	14 μm
numerical aperture	0.17
cutoff wavelength*	897 nm
spectral loss (dB/km)	1.073 at 1310 nm, 0.762 at 1550 nm
near field mode diameter**	6.59 μm at 1310 nm, 8.22 μm at 1550 nm

*0.1dB 이상을 나타내는 파장을 cutoff wavelength로 잡았음.

**Petermann 방식에 의해 측정되었음.

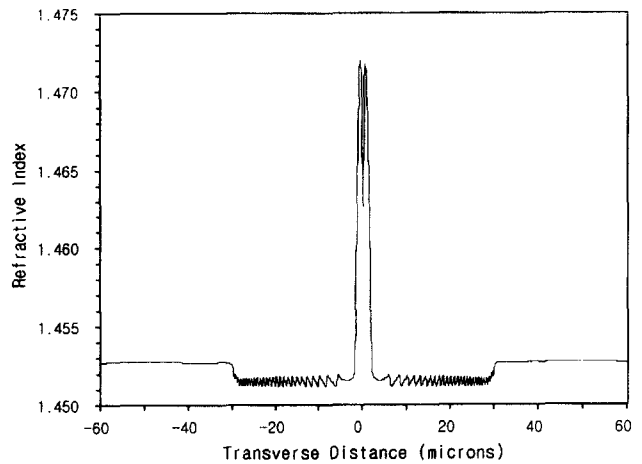


그림 22. 제작된 편심 코어 광섬유 굴절율 프로파일.

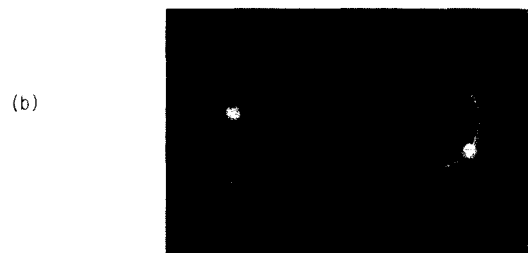
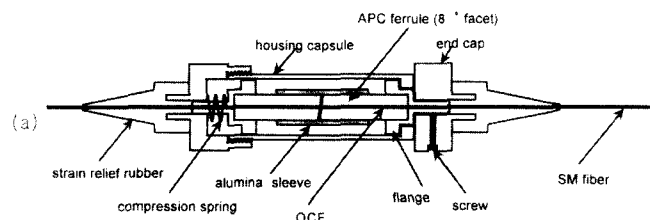


그림 23. 편심 광섬유를 이용한 가변광감쇠기의 조립도(a) 및 패키지 사진 (b).

파장 대역에서 측정하였다. 1550 nm 파장을 기준으로 하여 감쇠량이 2, 5, 10, 15, 20 dB 일 때 측정 파장 대역에서의 파장에 대한 감쇠량의 변화가 그림 25에 나타나 있다. 감쇠량은 파장이 짧아질수록 거의 선형적 증가함을 알 수 있다. 결과 각각, 1550 nm와 1310 nm에서의 감쇠량 차이($L_{1550-1310}$)를 살펴보면

1550 nm에서 2 dB인 경우 $L_{1550-1310} \approx 1.2\text{dB}$, 5dB인 경우 $L_{1550-1310} \approx 2.6\text{dB}$ 등으로 나타났다. 이하 표 4에 요약되어 있다. 표 4에서 처럼 가변감쇠량은 파장이 짧아짐에 따라 1550 nm 파장에서의 감쇠량을 기준으로 약 50%/(1550 nm~1310 nm)의 기울기를 가지고 선형적으로 감소하였다. 감쇠량과 파장과의 관계는 모드 필드 직경(mode field diameter) $2w_0$ 와 파장 λ 과의 다음 관계식으로부터 알 수 있다.

$$2w_0 = \frac{2\lambda}{\pi \tan \theta_w} \quad (7)$$

식 (7)은 모드 필드 직경이 파장에 선형적으로 비례함을 나타낸다. 모드 필드 직경이 커짐에 따라 출력단으로 입사하는 빔의 세기 또한 증가할 것이므로 감쇠에 의한 손실은 줄어들게 된다.

3.2 광섬유 커플러 및 WDM(Fiber Optic Coupler and WDM)

3.2.1 개요

광섬유커플러는 광의 세기를 분배하는 분배기(splitter) 및 파장선택성을 가지는 WDM(Wavelength Division Multiplexing) 커플러로 대별할 수 있다. 이러한 커플러들은 광분배망 및 쌍방향 시스템에서 유용하게 쓰여질 것으로 전망된다. 최근에는 파장무의존형 광섬유커플러는 초고속 WDM 혹은 OFDM(optical frequency division multiplexing) 및 쌍방향 WDM 시스템에서 중요성이 부각되고 있다.

본 연구는 정보통신부의 HAN/B-ISDN 과제의 수동광부품

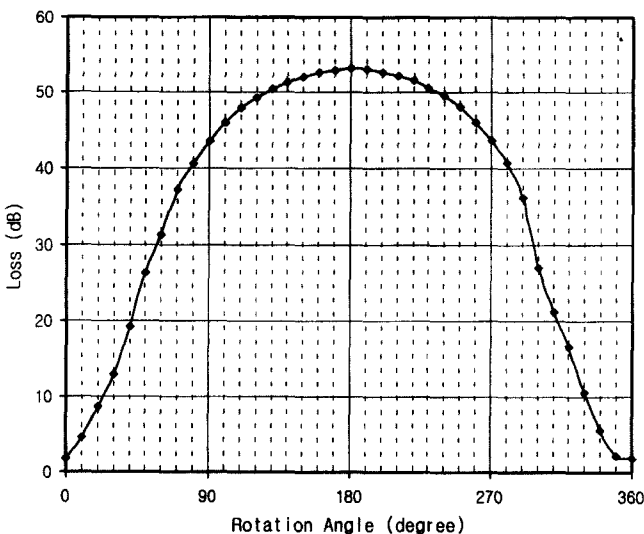


그림 24. 8°경사단면을 가지는 광섬유 가변광감쇠기의 편심 코어의 회전에 따른 감쇠 손실.

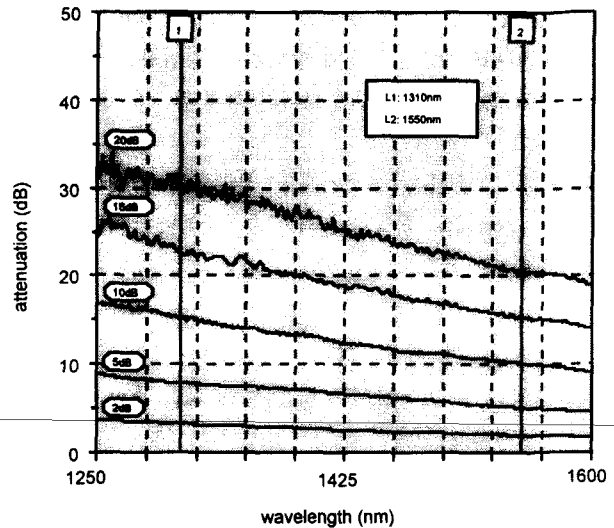


그림 25. 광섬유 가변광감쇠기의 감쇠량의 파장의존성 (1550 nm에서의 감쇠손실: 아래 곡선으로부터 2, 5, 10, 15, 20 dB). 각 곡선에 대한 1550 nm를 기준으로 한 감쇠량 기울기는 $(L_{1550}-L_{1310})/L_{1550} \approx 55\%$ 로 대략 일정함을 주목.

표 4. 1550 nm와 1310 nm 파장에서의 감쇠 손실비

Attenuation Loss (dB) at 1550nm	Attenuation Loss (dB) at 1310nm	Loss difference, $(L_{1550}-L_{1310})$ (dB)	$(L_{1550}-L_{1310})/L_{1550}$ (%)
2	3.15	1.15	58
5.1	7.7	2.6	52
10.1	15.2	5.1	51
15.4	22.9	7.5	49
21	30	11	53

개발의 과제중의 한 과제로서 1×2, 1×4, 1×8, 1×16 및 980/1550, 1310/1550 WDM 등의 광통신용 부품 개발 및 3개 사에 기술이전을 수행한 과제이다. 이러한 광섬유부품들은 FBT(Fused Biconical Taper) 방법을 이용하였다. FBT 방법은 도파로형이나 광학소자형에 비하여 공정이 간단하고 가격 경쟁력이 높아 상품화에 유리한 장점이 있다. 본 연구에서는 광섬유커플러의 해석, 집적형 4×4 커플러, 다분기 광섬유 커플러의 제작방법, 최적의 공정개발 및 특성향상에 관한 연구가 수행되었다. 여기서는 개발결과를 중심으로 서술한다^[1].

3.2.2 제작 및 특성

1) 이론 및 제작방법

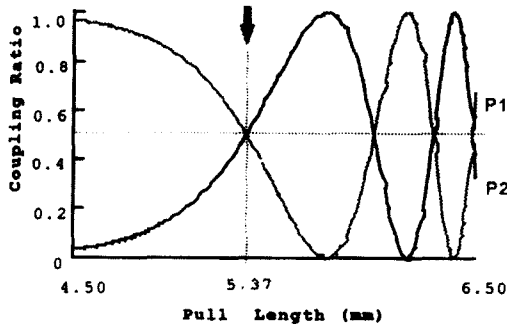
1×2 광섬유커플러의 입력 단자에 출력이 1인 입력에 대하여 출력단자 1 및 2의 출력을 P_1, P_2 라 하면 P_2 는 다음 (8) 식과 같이 표현된다^[2].

$$P_2(z) = A_2(z) A_2(z)^* = P_0 c^2 / k^2 \sin^2 kz \quad (8)$$

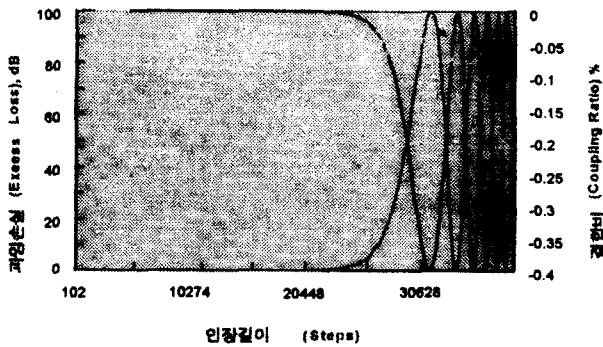
여기서 c 는 아래 식과 같이 표현되는 결합계수, β 는 전파상수, k 는 결합계수와 전파상수와 관련된 함수로 다음 (9)식과 같다.

$$c = -\frac{\omega \epsilon_0}{4} \int_{-\infty}^{+\infty} (n^2 - n_1^2) \mathbf{E}_1^* \cdot \mathbf{E}_2 dx dy \quad (9)$$

여기서 n 과 n_1 은 코어와 클래딩의 굴절율이다. 상기 식들을 이용하여 광섬유 커플러의 해석, 설계 및 공정최적화에 이용된다. 상기 식들을 이용하면 인장 길이에 따른 결합비를 해석할 수가 있다. 그림 26의 (a)는 인장 길이에 대한 결합비의 변화를 해석한 예이다. 그림 26의 (b)는 실제 측정된 인장길이에 대한 결합비 변화 그래프이다. 이런 결과는 광섬유 커플러 및 WDM을 결정하며 분기비 등의 특성을 좌우하는 가장 중요한 요소이다.



(a) 해석값



(b) 실험값

그림 26. 인장길이에 대한 결합비 변화 그래프.

특히 인장길이에 대한 공정조건을 분석함으로써 시제품의 특성 향상, 수율 향상, 공정개선 및 공정최적화 조건 등을 분석할 수 있다.

광섬유 커플러 및 WDM 제작을 위하여 기본적으로 이용한 제작방법은 FBT 방식이다. 사용된 열원은 수소가스(H_2)이며, 토치는 10 mm 크기를 이용하였다. 1×2 커플러의 경우, 피크 수 1, 인장속력 좌우 100 steps/sec, 가스압력 3.0SCCM 등이다. 제작된 제품의 사진은 그림 27과 같다.

2) 커플러의 특성

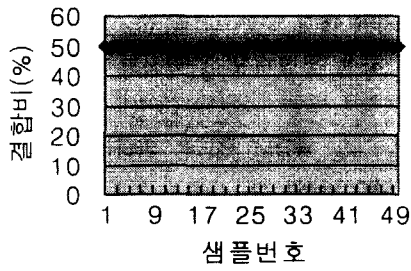
1×N 광섬유 커플러의 특성은 1×2 및 1×4 커플러의 특성이 좌우하므로 여기서는 이들 단위 커플러 특성만을 나타낸다. 1×2 광섬유 커플러의 특성은 그림 28~29에서 보여주는 바와 같이 과잉손실은 평균 0.13 dB이고, 균일도(uniformity)는 평균 0.4 dB의 우수한 특성을 나타냈다. 단일공정형 1×4 광섬유 커플러의 특성은 그림 3에서 보여주는 바와 같이 과잉손실은 평균 0.23 dB이고, 삽입손실 6.4 dB, 균일도 0.5 dB의 우수한 특성을 나타냈다. 이러한 값들은 상품화 되어있는 캐나다의 Canstar사 또는 E-Tek사의 제품규격 보다 우수한 특성을 보였다. 1×2 단위 커플러를 이용하여 용착 접속 없이 제작한 트리형 커플러인 1×8의 경우 과잉손실은 평균 0.69 dB이고 균일도는 0.5 dB로서 매우 우수한 특성을 나타냈으며, 1×16의 경우 과잉손실은 0.82 dB이고, 삽입손실은 11.4~12.2 dB이며 균일도는 0.8 dB의 매우 우수한 특성을 가졌다. 이와 같이 손실 특성이 우수한 이유는 용착접속이 필요 없는 공정을 이용하였기 때문이다^[1].

3) WDM 특성

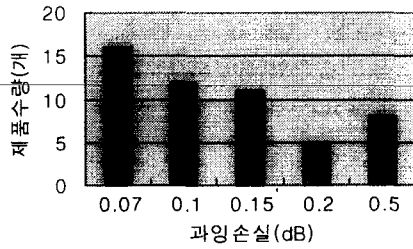
WDM의 주요 특성은 삽입손실 및 아이솔레이션(isolation)이다. WDM의 특성측정은 1310/1550 nm 파장용 WDM 경우에는 isolation 평가를 위한 파장의존특성을 측정하였고, 980/1550 nm 파장용 WDM의 경우에는 삽입손실 및 파장의존특성을 측정을 하였다. 측정된 과잉손실, 삽입손실, 파장의존특성 및 아이솔레이션 등은 표 5 및 표 6에 정리하였다. 1310/1550



그림 27. 시제품사진.



(a) 분기비



(b) 손실 특성

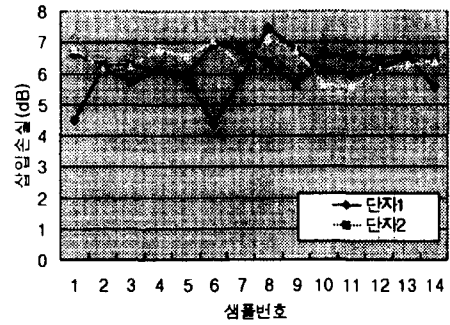
그림 28. 1×2 광섬유커플러 특성.

nm WDM 시제품의 경우 1310 nm 대역에서 삽입손실은 0.3 dB 이하, 아이솔레이션 18 dB 이상의 결과를 얻었으며, 1310/1550±20 nm 대역에서 아이솔레이션 17 dB 이상의 특성을 나타내었다. 980/1550 WDM 시제품의 경우 1550 nm 파장에서 삽입손실은 0.24 dB 이하의 우수한 특성을 가지고 있으며, 아이솔레이션은 1550 nm 파장에서 25 dB 이상의 값을 보여주고 있다. 이러한 값들은 미국의 E-TEK사 혹은 캐나다의 Canstar사에 비하여 동등 이상의 우수한 특성들이다.

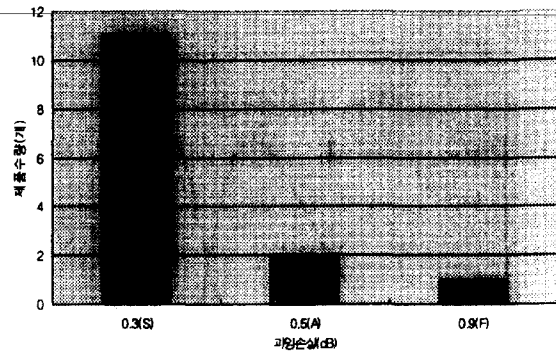
4) 환경특성

본 연구에서는 환경 및 신뢰성에서 가장 중요한 시험 항목인 (1) 고온고습시험(Temperature-Humidity Aging) (2) 고온고습 반복시험 (3) 기계적 진동시험(Mechanical Vibration Test) 을 실시하여 제품의 특성을 측정 및 평가하였다.

온도특성은 6시간 동안 온도를 -15°C~80°C 동안 변화하면서 5°C 간격으로 삽입손실을 측정하였다. 샘플들의 온도 특성 변화는 그림 30에서 보여주는 바와 같이 WDM은 0.1 dBm의 특성 변화를 나타내어 온도계수 0.0010 dB/°C의 특성을 보였으며, 커플러들은 약 0.05 dBm의 변화를 보여, 0.0003 dB/°C의 온도계수를 가졌다. 기계적 진동시험(Mechanical Vibration Test)은 10 Hz부터 55 Hz까지 1시간 동안 변화시키면서 진폭을 1.52 mm 유지하였다. 이것을 역으로 반복함으로써 총 2시간 동안 시험하였다. 측정결과 WDM은 약 0.1 dBm의 특성 변화를 나타내었으며, 커플러들은 약 0.02 dBm의 비교적 우수한 특성 변화를 보였다.



(a) 삽입손실



(b) 손실 특성

그림 29. 1×4 커플러 특성.

표 5. 1310/1550 nm WDM 시제품의 특성측정표

번호	과잉손실 dB	삽입 손실				Isolation(dB) ± 20 nm
		1310 nm		1550 nm		
		CR1(%)	CR2(%)	CR1(%)	CR2(%)	
DWO1	-0.09	99.87	0.13	0.32	99.68	17
DWO2	-0.27	99.84	0.16	0.46	99.54	18
평균	-0.18	99.86	0.14	0.39	99.61	17.5

표 6. 980/1550 nm WDM 시제품의 특성측정표

번호	과잉손실 dB	삽입 손실				Isolation(dB) ± 15 nm
		980 nm		1550 nm		
		CR1(%)	CR2(%)	CR1(%)	CR2(%)	
DWO1	-0.50	0.3	99.7	-0.50	-30.27	18
DWO2	-0.30	0.5	99.5	-0.32	-27.97	18
DWO3	-0.35	0.3	99.7	-0.36	-26.99	22
DWO4	-0.24	1.6	98.4	-0.29	-20.56	20
DWO5	-0.47	0.5	99.5	-0.50	-22.00	20
평균	-0.37	0.64	99.36	-0.4	-25.56	19.6

3.2.3 결론

수동광부품 개발의 과제중의 한 과제로서 광통신용 1×2, 1×4, 1×8, 1×16 커플러 및 980/1550 nm, 1310/1550 nm

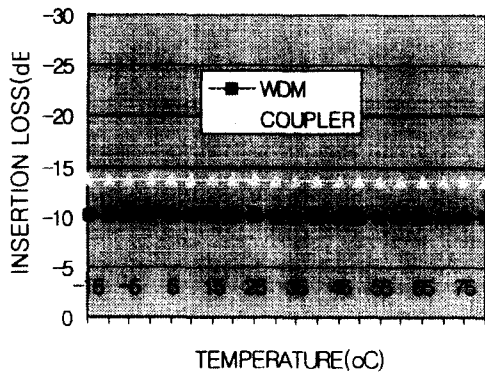


그림 30. 온도의존 특성 그래프.

WDM을 상품화가 가능한 수준의 개발을 성공적으로 수행하였으며, 3개사에 기술이전을 완료하였다. 기술이전 동안에는 1×2, 1×4, 1×8, 1×16 광섬유커플러 및 1310/1550, 980/1550 파장용 WDM 외에도 단일공정형 1×4 및 WIC 등을 기술이전하였다. 이와 함께 원부자재 국산화, 패키지 시험제작, 공정개선, 파장특성 향상, 아이솔레이션 향상 등을 위한 특성향상 및 최적의 공정해석을 하였다. 이 결과 패키지의 일부를 국산화하였고, 최적의 공정개발 및 1×4 단위 커플러의 양품을 향상 등을 통하여 경쟁력 있는 제품을 생산할 수 있는 기술을 개발하였다. 이러한 기술들은 기술이전 업체에서 경쟁력 있는 제품 생산에 기여할 것으로 기대하며, 나아가 신제품개발 및 경영에도움이 될 것이다.

4. 박막간섭형 광소자

박막간섭형 광필터는 높은 신뢰성과 광범위한 응용성을 바탕으로 다양한 다른 형태의 소자에 비해 폭넓게 적용되고 있다. 박막간섭형소자의 그 핵심요소는 크게 박막간섭필터의 설계 및 제작과 신뢰성 있는 패키지이다. 박막간섭필터의 종류와 패키지의 형태에 따라 가변광필터, EDFA용/지역네트워크용 WDM 필터, Gain Flattening 필터, Add/Drop 필터, 400/200/100/50 GHz 용 Dense WDM 필터 등의 여러 종류의 광소자 구현이 가능하다. 또한 삽입손실, 아이솔레이션, 편광손실 등의 광특성과 환경영향특성이 우수하여 향후 적용범위가 확대되리라 예상됨에 따라 그 연구가 꾸준히 진행되어야 할 것이다. 본 내용은 가변광필터와 광증폭기용 및 지역네트워크용 WDM 필터에 대한 연구된 결과로서 설계 및 제작과 특성에 관해 기술할 것이다.

4.1 가변광필터

WDM을 포함한 OFDM 전송시스템에서 빠른 동조속도로

원하는 채널선택을 목적으로 하는 가변광필터는 광전송방식의 핵심소자이며 광필터의 성능향상은 광전송시스템의 성능과 직접 연관되어 다양한 광다중방식의 발전을 가능케 하는 요소이다. 본 연구는 이러한 필요성으로 광증폭기의 파장증폭영역인 1530~1580 nm에서 선폭(FWHM)이 1 nm 이하, Finesse가 50 이상인 광섬유형 가변광필터의 개발에 목표를 두어 개발되었다.

4.1.1 기본동작

일반적으로 사용되는 fiber Fabry-Perot 필터의 구조를 나타내고 있다(그림 31). 두 개의 마주하는 광섬유의 단면에 고반사율의 미러코팅을 하여 공진기를 구성한 후 특정 공진 길이에서 원하는 파장의 빛이 방출 되도록 하는 방식으로 공진기 길이, 내부의 굴절율과 미러의 반사율에 따라 특성이 결정된다. 이때 PZT는 양쪽 공진기 사이에 고정되어 미소변위를 조절하므로써 채널을 조절할 수 있다.

4.1.2 기본이론

1) Fabry-Perot 간섭계

레이저, 재료과학, 원자물리와 광통신을 포함하는 많은 과학의 분야에서 근본적인 정보를 제공하는 Fabry-Perot 필터는 평행한 두 미러와 미소거리 변화소자로 구성되며 두 거울의 거리 변화가 가능할 때 이 장치를 간섭계라 하고, 미러의 간격을 일정하게 하였을 때를 에달론이라 한다(그림 32). Fabry-Perot 필터에서 두 미러의 반사계수를 r , 미러간격을 d , 미러사이의 물질의 굴절율을 n 라 하면 파장 λ 인 입사빔이 θ 의 각도로 입사될 때 두미러 사이의 다중반사에 의한 빔의 투과도 T 는 다음과 같이 주어진다.

$$T = \frac{I_T}{I_i} = \frac{1}{1 + \frac{4r^2}{(1-r^2)^2} \sin^2\left(\frac{\delta}{2}\right)} \quad (10)$$

2) Finesse (F)

Finesse는 어느 한 채널이 이웃 채널에 의해 간섭받지 않음

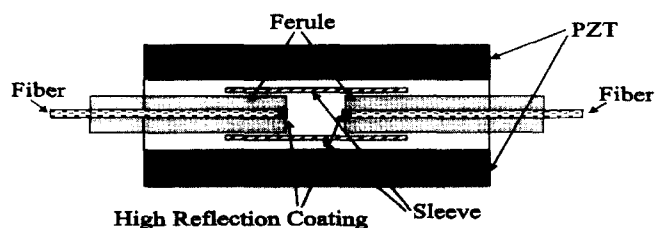


그림 31. 가변광 필터의 내부 구조도.

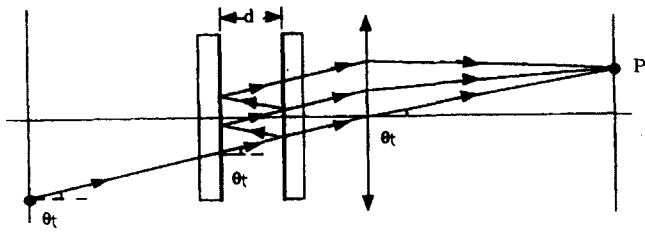


그림 32. Fabry-Perot Etalon 투과특성.

면서 동시에 얼마나 많은 채널이 사용될 수 있는지를 나타내는 지표로서 미러 반사율과 평평도, 입사빔의 평형에 의존한다. Finesse 계수는 간섭 줄무늬의 예리함 정도를 나타내며 앞의 투과도 관계식으로부터

$$f \equiv \frac{4r^2}{(1-r^2)^2} = \frac{4R}{(1-R)^2} \quad (11)$$

와 같이 정의된다.

Finesse는 대역폭과 FSR의 비로 정의되며 fringe사이의 위상차는 2π 이고 대역폭은 $2\delta_c$ 이므로 finesse는 다음과 같이 반사도만의 함수로 나타낼 수 있다(그림 33).

$$F \equiv \frac{FSR}{FWHM} = \frac{2\pi}{2\delta_c} = \frac{2\pi}{4} \sqrt{f} = \frac{\pi\sqrt{R}}{(1-R)^2} \quad (12)$$

4.1.3 다층박막미러 설계 및 제작

물질의 고유 손실이 적은 유전체 물질로 다층박막미러를 설계할 때 굴절율 및 두께, 층수의 함수로 transfer 행렬식을 유도하여 다층박막미러의 반사대역폭과 반사율을 임의로 선택할 수 있다. 기판의 굴절율을 변화는 실리콘 웨이퍼, 광콜리메이터, 유리 등의 기판의 종류에 따라 약간 달라지나 그 변화가 1.485~1.50이며 첫 층인 TiO_2 의 굴절율이 기판에 비해 상대적으로 높고 10여층 이상의 다층박막이기 때문에 기판의 굴절율에

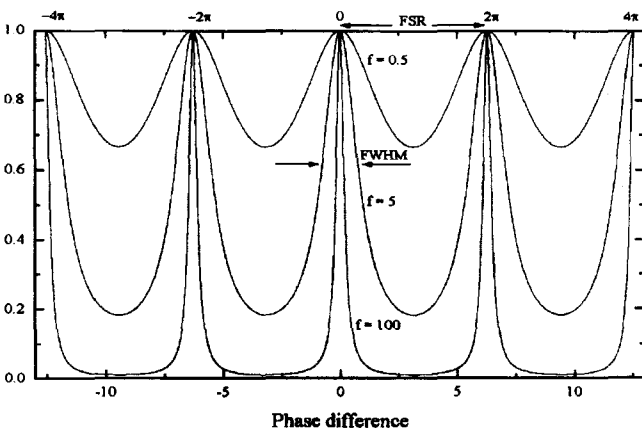


그림 33. Fabry-Perot 필터의 투과 곡선.

의한 다층박막미러의 반사율에 대한 영향은 매우 작다. 그러나 박막물질의 굴절율은 다층박막미러의 반사율과 반사 대역폭을 결정하는 주요 인자이므로 설계시 정확한 굴절율을 아는 것이 필요하다.

일반적으로 높은 반사율을 갖는 미러를 제작하기 위해서는 $\lambda/4n_f$ 인 위상두께와 굴절율이 서로 다른 물질을 교번 코팅하여 얻을 수 있다. 본 연구에서는 고반사율의 미러를 제작하기 위해 $\lambda/4n_f$ 의 위상두께와 굴절율이 서로 다른 TiO_2 , SiO_2 를 교번한 이중층 구조의 다층박막미러를 설계하였다. 설계에 따른 시뮬레이션 값과 제작된 미러의 측정값이 그림 34와 35에 각각 나타나 있다.

4.1.4 콘트롤러 제작

1) Fabry-Perot형 가변광필터의 안정화를 위한 콘트롤러 개발
광 WDM 시스템을 실현하기 위하여 필요한 기술은 신호 광에 대한 주파수 안정을 위한 채널 주파수 간격의 locking 기술과 채널 선택을 위한 주파수 동조 필터 기술들이 필요하다. 이것을 구현하기 위하여 광 필터가 반드시 요구되어진다. 이러한 시스템을 구성하기 위하여 필터의 중심 파장을 특정한 파장에

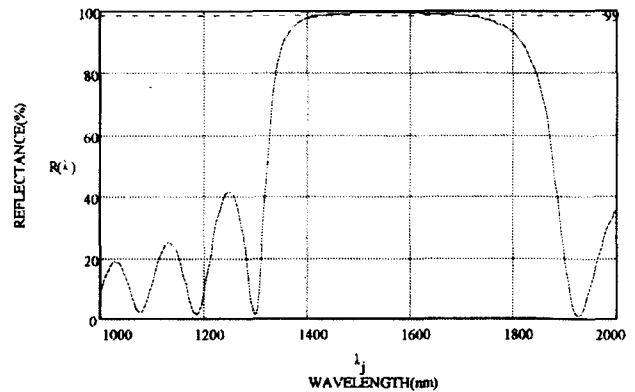


그림 34. 설계된 박막미러의 반사도 곡선.

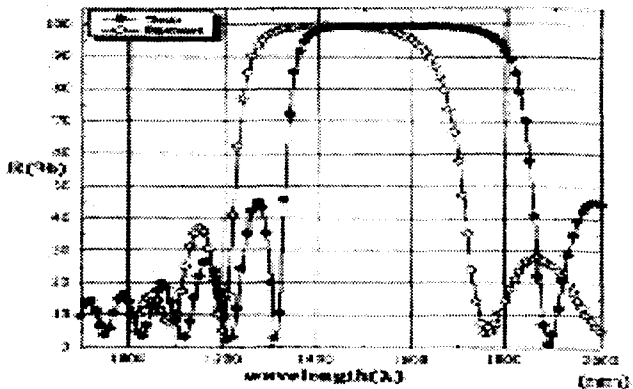


그림 35. 박막미러의 설계와 측정치 비교.

고정하는 가변광필터 안정화 시스템에 대한 연구가 요구되어진다. 광섬유 Fabry-Perot 필터는 공진기의 길이를 THC (Thermoelectric heater/collers)나 PZT 또는 그 외의 기계적인 방법에 의존하여 조절한다. THC는 광섬유 Fabry-Perot 필터에 온도를 가하여 공진기의 길이를 조절하는 형태로 대략 20°C에서 30°C의 온도 변화를 시키며 이때의 FSR은 약 85%로 나타난다.

PZT를 이용하여 공진기의 길이를 조절하는 경우로 PZT의 전압을 인가하면 PZT의 길이가 대략 수 nm로 변하여 공진기의 길이를 변화시킨다. 그러나 이 PZT는 주위 온도에 따라 민감하게 변화하여 온도 보상이 요구되어진다. PZT에 대한 온도 보상은 PZT의 온도 특성과 반대 특성을 가지는 물질(금속류)을 사용하거나 PZT 컨트롤러를 사용하여 온도 보상을 할 수 있다(그림 36).

온도가 20°C에서 50°C까지 변화할 때 필터의 중심 파장(1520 nm에서 1580 nm까지)은 컨트롤러에 의해 제어되어 선택된 필터의 중심 파장에 거의 가깝게 유지시켜 준다. 필터의 온도 수동 보상이 된 경우는 80 nm(0.36 FSR), 온도 보상이 안된 경우는 29 nm(1.0 FSR)의 큰 오차가 발생하나 본 연구 결과 오차가 2 nm 정도로 나타나는 것을 알 수 있었다.

4.1.5 시제품특성

RF 스퍼터 증착법에 의해 제작된 TiO₂와 SiO₂ 박막의 굴절율은 2.22과 1.45이었으며 $\lambda/4n$ 로 예상된 박막두께는 각각 175 ± 2 nm와 266 ± 3 nm으로 비교적 균일한 것임을 알 수 있다. 다층박막의 반사율은 70 nm 정도 단파장으로 이동하였으나 설계시 반사대역폭을 충분히 크게 하여 영향을 최소화하였으며 최대반사율이 1550 nm에서 98.24로 측정되어 설계치와 잘 일치함을 알 수 있다.

박막공정의 안정화 · 최적화로 패키지 전 광콜리메이터로 제

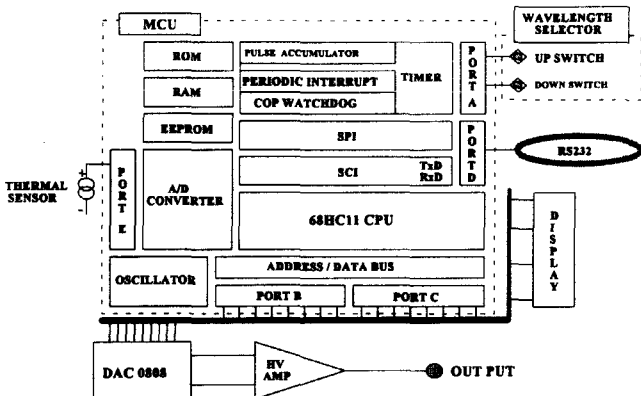


그림 36. FFP Filter의 Control system의 설계 블록도.

작된 가변광필터는 FSR이 20~50 nm에서 Finesse 50~100이며 FWHM은 0.3~0.6 nm이다(그림 37). 동조특성의 분해능은 컨트롤러와 PZT의 분해능과 연관되며 제작된 가변광필터의 경우 1.5 nm로 동조가 가능하다. FSR이나 FWHM에 못지 않게 중요한 필터의 특성으로 이웃채널간의 crosstalk는 필터의 특성평가를 위한 요소이다(그림 38). 각 시제품의 crosstalk를 고려한 20 dB 선폭을 측정된 결과 2~3 nm이며 이로부터 예측할 수 있는 것은 40 nm 광대역 영역에서 20 dB 이하의 crosstalk를 고려한 채널 수는 각각 16 채널이 선택될 수 있으며 WDM 전송시스템에서 요구되는 광필터에 대한 특성사양을 만족하며 HDWDM 전송시스템에서도 적용 가능한 것임을 알 수 있다. 제작된 가변광필터의 시작품 사진이 그림 39에 나타나 있다.

4.2 지역네트워크 WDM 필터

WDM(Wavelength Division Multiplexer)소자는 CATV 및 지역네트워크 등의 쌍방향 광통신시스템과 광증폭기의 광원여기(optical pumping)에 사용되는 핵심부품이다. 본 연구소가 개발

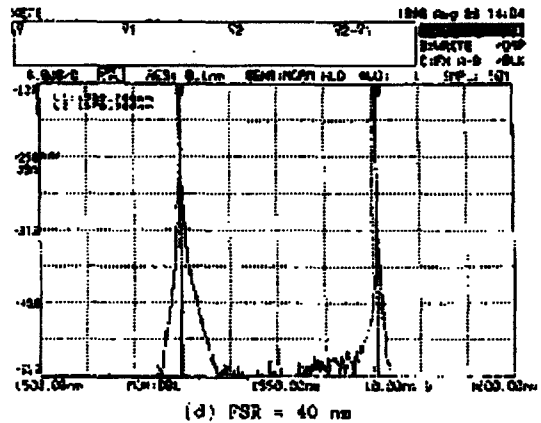


그림 37. 가변광필터의 특성.

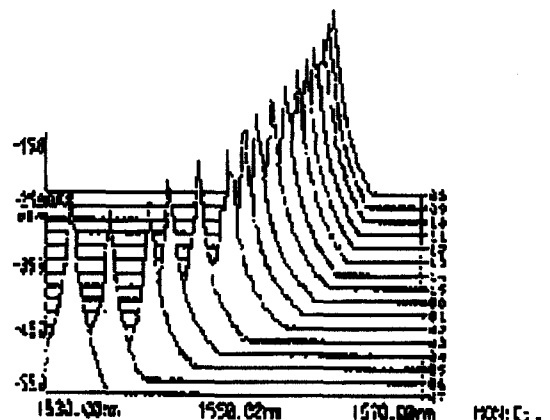


그림 38. 가변광필터의 가변특성.

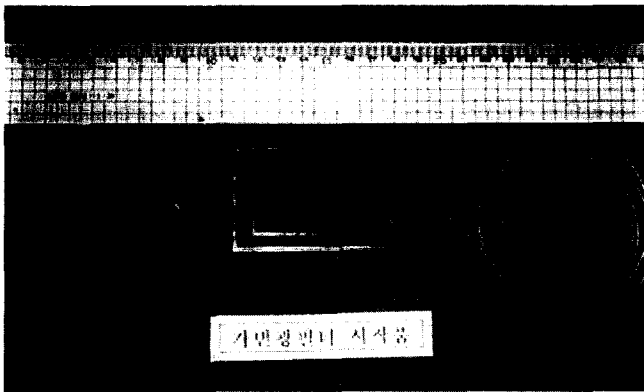


그림 39. 가변광필터 시제품.

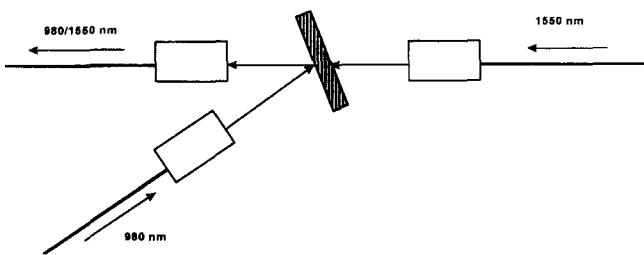


그림 40. WDM 필터의 내부 구조 및 동작 원리.

한 마이크로렌즈형 고이솔레이션 WDM 소자는 간섭막막필터를 이용한 파장다중분할소자로서 쌍방향통신에 사용되는 1310/1550 nm용과 광증폭기에 사용되는 980/1550 nm용으로 구분된다. 삽입손실과 아이솔레이션이 각각 최대 0.8 dB 이하와 50 dB 이상인 광특성을 갖음으로서 기존의 국외제품에 비해 전혀 손색이 없어 수출 및 수입대체 효과와 더불어 국내 광통신시스템의 생산성 향상을 기대할 수 있다.

4.2.1 동작원리

파장분할다중소자인 980/1550, 1310/1550 nm 소자는 관련 두파장별 합파/분파의 기능을 갖는다. 그림 40은 980 nm와 1550 nm의 파장이 각기 다른 경로로 입사하여 한 경로로 합파되는 상황을 도해하였다. 세계의 광콜리메이터와 한 개의 간섭필터를 사용한 가장 단순한 구조로서 아이솔레이션을 높이기 위해서는 각 경로에 LPF(Long Pass Filter)와 SPF(Short Pass Filter)를 사용하기도 한다.

4.2.2 간섭필터의 설계 및 제작

980/1550 nm, 1310/1550 nm WDM용 간섭필터에 대한 반사코팅막막을 설계 및 제작하기 위해 흡수손실이 최소한이며 광학상수의 최적화와 챔버의 오염을 고려한 유전체물질인 TiO_2 와 SiO_2 를 선택하였다. TiO_2 와 SiO_2 는 유전체물질로서 흡계수가 거의 zero이며 제작된 TiO_2 와 SiO_2 의 굴절율은 각각 2.18과

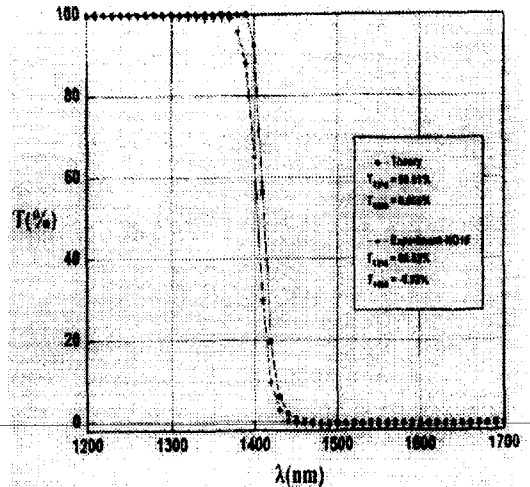


그림 41. Short Pass Filter.

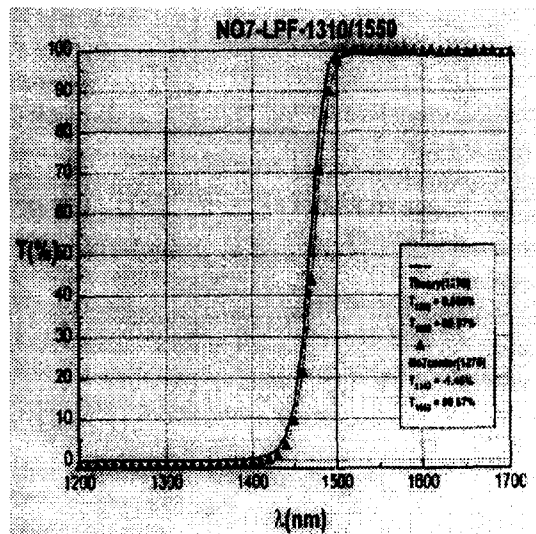


그림 42. Long Pass Filter.

1.45이며 고굴절율과 저굴절율의 비가 0.66이기 때문에 박막물질로서는 매우 양호하다. 박막제작은 RF Magnetron Sputter를 사용하였으며 그 공정조건은 Ar과 O_2 분위기에서 Si와 Ti를 박막물질로 사용하여 수 10^{-3} torr에서 공정을 진행한다.

30층에 가까운 고굴절물질과 저굴절물질의 불규칙한 교번박막의 설계는 각파장에 대해 LPF와 SPF로 나뉜다. 특히 WDM 간섭필터의 경우 아이솔레이션을 향상하기 위하여 normalized thickness를($center\ wavelength/4n$)=1로 하여 side band의 damping을 최소화하는 방향으로 설계되어야한다. 설계된 기본구조는 다음과 같으며 이것을 기본으로 side band의 damping을 최소화하기 위한 최적화가 요구된다. 설계된 1310/1550 nm 간섭필터에 대한 SPF와 LPF의 이론치와 측정치가 그림 41과 42에 각각 비교되어있다. 그 결과 투과곡선이 거의 일치됨을 알 수

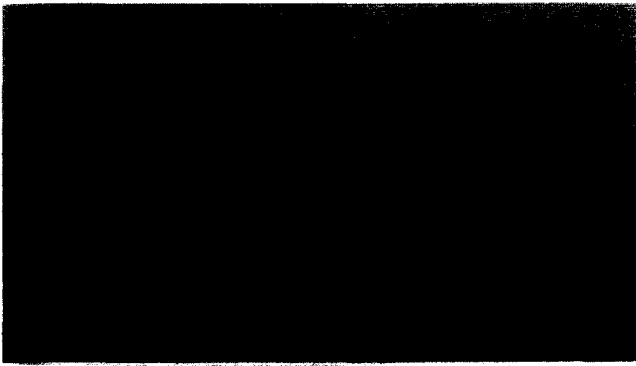


그림 43. BOX형 WDM 기능시제품.



그림 44. 원통형 WDM 기능시제품.

있으며 해당파장에 대해 99.9% 이상의 고투과율과 0.1% 이하의 저투과율을 나타내었다.

[박막 간섭필터의 적층 구조]

980/1550 nm SPF:

Air $[(H/2, L, H/2)^9 \{(H/2, L, H/2)^2/0.9\}(H/2, L, H/2) \{(L/2, H, H/2)/0.8\} L/1.7]$ SUB 980/1550 nm LPF:

Air $[\{(H/2, L, H/2)^2/0.85\}(H/2, L, H/2)^8 \{(H/2, L, H/2)^2/1.10\} (L/2, H, H/2)^2]$ SUB 1310/1550 nm SPF:

Air $[(H/2, L, H/2)^{11} \{(H/2, L, H/2)^2/0.8 (H/2, L, H/2)\}]$ SUB 1310/1550 nm LPF:

Air $[(H/2, L, H/2)^{10} \{(H/2, L, H/2)^8/1.05\} (H/2, L, H/2)^3]$ SUB

4.2.3 시제품의 제작 및 평가

패키징은 나사와 에폭시를 이용하였으며 3개의 광콜리메이터를 이용한 박스형(그림 43)과 두 개의 광콜리메이터와 dual capillary를 이용한 원통형(그림 44)의 980, 1310/1550 nm WDM 필터를 제작하였다.

4.2.4 시제품의 특성

제작된 980, 1310/1550 nm WDM 필터의 특성은 0.8 dB 이하의 삽입손실, 50 dB 이상의 아이솔레이션, 0.02 dB 이하의 편광손실을 가지며 소형으로서 박막간섭형의 국외제품과 동등한 사양이며 다른 형태의 광소자와 비교해 그 특성이 매우 우수함을 알 수 있다.