

마하젠더 간섭계로 구성된 실리카 평판 광 도파회로 트라이플렉서의 설계 및 분석

이태형 · 이동현 · 정영철[†]

광운대학교 전자통신공학과

☎ 139-701 서울특별시 노원구 월계동 447-1 참빛관 712

(2007년 10월 9일 받음, 2007년 11월 7일 수정본 받음)

실리카 평판 광집적회로 마하젠더 간섭 구조를 이용한 트라이플렉서를 제안하고, 시뮬레이션을 통해 그 특성을 분석하였다. 1310 nm 대역과 1480~1560 nm 대역을 분리하기 위하여 마하젠더 암의 길이 차는 1310 nm 파장의 정수배 더하기 반 파장으로 하고, 방향성 결합기의 균형도는 1480~1560 nm 대역에서 적정화하였다. 이와 같은 마하젠더 간섭 구조를 한 단 더 사용함으로써, 매우 우수한 채널 누화 특성을 얻을 수 있었다. 1490 nm 대역과 1550 nm 대역을 추가적으로 분리하기 위하여 마하젠더 간섭구조를 추가로 두 단 더 사용하였다. 삼차원 BPM과 전송행렬방법을 통하여 각 채널들 사이의 낮은 누화 특성을 확인하였고, 제작 과정에서 발생할 수 있는 공정오차에 둔감한 특성을 보임을 확인하였다.

주제어 : Planar waveguides, Silica, Integrated optics, Optical filters

I 서 론

최근 ADSL/VDSL 가입자망을 통해서 제공되는 2~10 Mbps 정도의 고속 가입자 전송서비스망이 구축되고 관련 서비스 산업이 활성화됨으로써, 국내의 인터넷 산업은 비약적인 발전을 이루게 되었다. 그럼에도 불구하고, HDTV급의 영상 서비스 등을 원활하게 제공하는데 있어서 ADSL/VDSL 정도의 전송 용량은 부족한 것으로 인식되고 있으며, 약 100 Mbps 정도의 초고속 서비스를 원활하게 제공하고자 하는 노력이 계속되고 있다. 이와 같은 노력의 일환으로 일본에서는 100 Mbps 급을 원활히 제공할 수 있는 시스템으로서 PON(Passive Optical Network) 기반의 FTTH(Fiber-to-the-Home) 시스템의 구축 사업이 정부의 지원 아래 NTT 등의 통신회사를 중심으로 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 2008년경에는 FTTH 가입자 수가 ADSL/VDSL 가입자 수를 추월할 것으로 예측되고 있다.^[1] 국내에서도 이와 같은 상황에 자극받아, 정부의 BeN (Broadband Convergence Network) 구축과 FTTH 등을 차세대 국가 성장의 원동력으로 설정하고 KT, 하나로텔레콤 등을 중심으로 하여 FTTH 시범 사업에 이어 본격적인 서비스를 실시하는 등 FTTH의 확산을 위하여 노력을 집중하고 있는 실정이다.

현재 PON 시스템의 구성에 있어서, 광섬유의 사용을 최소화하고, 비용을 절감하기 위해서 다이플렉서(Diplexer)를 이용하여 한 가닥의 광섬유를 이용하여 양 방향 통신을 하는 방법은 일반적으로 활용되고 있다. 광섬유의 활용도를 더욱 향상시키기 위하여 트라이플렉서(Triplexer) 모듈을 이용함으로써, 한 가닥의 광섬유를 통하여 상향(1310 nm) 및 하향(1490 nm) 데이터, 음성은 물론 높은 대역폭을 필요로 하는 HDTV

급의 Video 방송신호(1550 nm)까지 효율적으로 전송을 가능하게 하는 TPS(Triple Play Service, 국제표준 ITU-T G983.3) 서비스가 미국에서 활발히 적용되고 있으며, 국내에서도 케이블 방송 사업자들을 중심으로 도입하려는 시도가 이루어지고 있다. 다시 말해 트라이플렉서는 전체의 광통신 망구축의 경제성을 고려할 때 본격적인 FTTH 시대를 여는 주역이 될 것으로 기대되고 있다.

한편, 현재 개발되고 있는 트라이플렉서들은 대부분 광 결합기, 박막 필터(TFF: Thin Film Filter)등의 개별 소자를 조립하여 실현되고 있다.^[2-4] 이러한 구조의 트라이플렉서를 제작하기 위해서는 평판 광 도파회로를 제작한 후에 추가로 필터 등을 부착시키는 정밀 가공 작업이 요구되기 때문에, 제작이 어렵고 대량생산에 적합하지 못하다는 단점을 갖는다. 이를 개선하기 위한 방법으로 브래그 격자가 구비된 평판 광 트라이플렉서가 시도되었지만, 이 역시 도파로 제작과정에서 브래그 격자를 생성하기 위한 추가적인 정밀한 공정이 요구되고 있다.^[5,6]

이런 기존의 구조와는 달리 본 논문에서는 마하젠더 간섭계만을 이용하여 단순화된 트라이플렉서를 설계함으로써, 저가에 대량 생산이 가능하고 세 파장을 안정적으로 분리할 수 있는 소자를 설계하였다. 또한 이러한 구조의 광 트라이플렉서를 삼차원 BPM(Beam Propagation Method)과 전송행렬방법(Transfer Matrix Method)을 이용하여 파장의 분리특성을 확인하였다. 논문의 구성은 II장에서 실리카 평판 광도파회로 트라이플렉서의 구조 및 동작원리에 대해 설명하고, III장에서는 BPM과 전송행렬방법을 통한 각 채널간의 누화특성을 분석하였으며, IV장에 결과들을 정리하였다.

[†] E-mail: ychung@kw.ac.kr

II. 마하젠더 간섭계를 이용한 광 트라이플렉서의 구조 및 동작원리

그림 1은 본 논문에서 제안한 트라이플렉서의 개략도이다. 본 트라이플렉서는 마하젠더 간섭계(MZI: Mach-Zehnder Interferometers)를 다단으로 연결한 평판 광 도파회로 기반의 필터로 구현된다. 마하젠더 간섭계를 이용한 광필터의 구현과 관련하여서는 이미 다양한 연구와 실험을 통해 발표된 바가 있다.^[7,8] 하지만 이와 같은 마하젠더 간섭계를 이용하여 필터를 구성할 경우 3-dB 방향성 결합기의 특성은 각 채널 간의 누화 값에 중요한 요소로 작용하게 된다. 따라서 넓은 파장 범위에서 동작하는 마하젠더 간섭계를 구성할 때 3 dB 방향성 결합기는 파장에 무관한 특성을 가지는 커플러(WINC: Wavelength Insensitive Coupler)를 사용하여야 한다.^[9] 그 이유는 1.31 μm ~1.56 μm 의 넓은 파장대역에서 파장에 무관하게 3 dB 분리 특성을 유지해야만, 마하젠더 간섭 구조의 파장 분리 특성이 일관되게 유지되기 때문이다. 그러나 실제 제작 공정 과정에서 도파로의 폭은 설계 값에 비하여 변화될 가능성이 상존하고 이로 인하여 WINC를 채용한 트라이플렉서의 성능 저하를 유발할 가능성 또한 존재한다. 한편, WINC는 도파로의 설계 과정이 복잡하고, 도파 구조의 길이가 상당히 길어지는 문제점을 보인다.

본 논문에서 제안한 트라이플렉서에서는 그림 2와 같이 1480 nm~1560 nm의 협대역에서만 적정화된 3-dB 방향성 결합기를 채용함으로써 1310 nm 대역에서는 3-dB 분기 조건을 만족시키지 못하더라도, 마하젠더 각 단의 암의 길이 차이를 적절히 정함으로써 채널 간 누화 값이 최소화되도록 하였다. 마하젠더 간섭 구조의 한 쪽 입력도파로로 입사되는 혼합 파장은 3 dB 커플러를 통해 분배가 되고 분배된 두 광파는 마하젠더 암의 길이 차이(ΔL)로 인해 각각의 신호로 분리되며 ΔL 은 식(1)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\Delta L = \frac{c}{2 \times \Delta f \times N_{eff}} \tag{1}$$

여기서, Δf 는 MZI의 bar 포트와 cross 포트에 출력되는 파장 채널에 해당하는 주파수의 차이를 말하며 N_{eff} 는 도파로의 군 굴절률, c 는 진공에서의 빛의 속도를 나타낸다. 여기서 ΔL

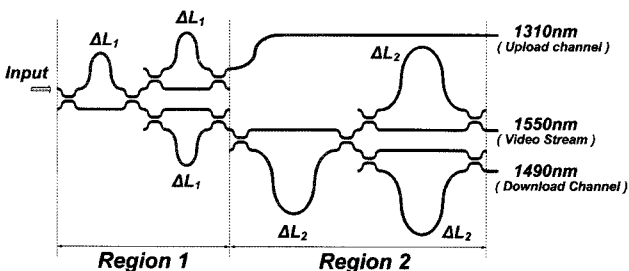


그림 1. 제안한 평판 광도파회로 기반의 트라이플렉서.

의 경로차를 갖는 마하젠더 간섭계의 두 출력(T_{bar} , T_{cross})은 식(2)과 식(3)과 같은 전달함수 형태로 주어진다.

$$T_{-} = \left| \sqrt{T - \kappa^2} e^{-j(2\pi/\lambda)n_{eff}\Delta L} \sqrt{T - \kappa^2} + (j\kappa) \right|^2$$

$$= \left| T e^{-j(2\pi/\lambda)n_{eff}\Delta L} - \kappa^2 (1 + e^{-j(2\pi/\lambda)n_{eff}\Delta L}) \right|^2 \tag{2}$$

$$T_{cross} = \left| j\kappa \sqrt{T - \kappa^2} + \sqrt{T - \kappa^2} e^{-j(2\pi/\lambda)n_{eff}\Delta L} (j\kappa) \right|^2$$

$$= \left| \kappa \sqrt{T - \kappa^2} (1 + e^{-j(2\pi/\lambda)n_{eff}\Delta L}) \right|^2 \tag{3}$$

여기서 T 는 방향성 결합기를 통과하는 전체 광 파워의 비율, $j\kappa$ 는 광 결합기에서 크로스 포트에 커플링 되는 필드의 광 결합비율이고, n_{eff} 는 도파로의 유효굴절률이다. 본 논문에서는 식 (1)을 통해 세 파장을 분리 할 수 있는 적절한 ΔL 을 근사적으로 구하고, 시뮬레이션을 통해 보다 정확한 값의 범위를 추출하였다.

본 논문에서 제안한 트라이플렉서의 설계에서 중요한 특징은 다음과 같다. 1310 nm와 1480~1560 nm 파장 대역을 분리하는 경우, 마하젠더 암의 길이 차이 ΔL_1 은 1310 nm 파장의 정수배 더하기 반 파장으로 정하고, 3 dB 커플러의 특성은 1480 nm와 1560 nm 사이의 파장대역에서 적정화함으로써 광대역에 걸쳐서 1310 nm와 1480 nm ~ 1560 nm 파장 대역을 안정적으로 분리한다. 여기서 식 (2)를 살펴보면 ΔL_1 이 1310 nm에서 정수배 더하기 반 파장으로 정해졌기 때문에 3 dB 방향성 결합기가 1310 nm에서 50 : 50의 비율에서 어긋나더라도, 1310 nm의 파장에 대해서는 T_{bar} 는 정확히 T 의 값을 가지고, T_{cross} 는 정확히 영이 됨을 알 수 있다. 한편, 방향성 결합기의 3 dB 특성이 1480 nm ~ 1560 nm의 파장대역에 적정화되었기 때문에, 이 파장 대역은 길이 차이가 근사적으로 식 (1)을 만족한다면, 누화 값이 적정하게 유지될 수 있다. 영역 2의 마하젠더 간섭 구조단에서의 ΔL_2 는 식(1)에 의해 얻어질 수 있으며 영역 1에서 분리되지 않은 1490 nm와 1550 nm 대역을 분리함으로써 세 파장을 분리하는 평

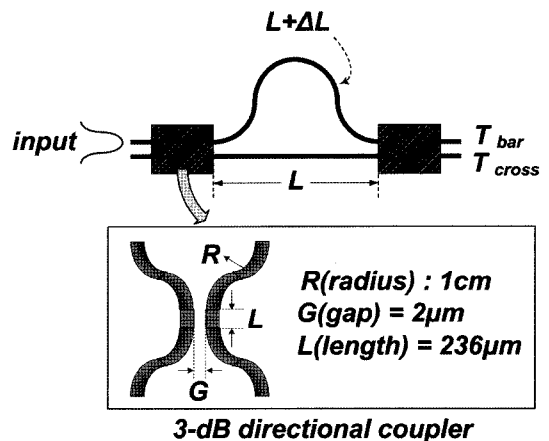


그림 2. 논문에서 고려한 3-dB 방향성 결합기와 마하젠더 간섭계의 구조.

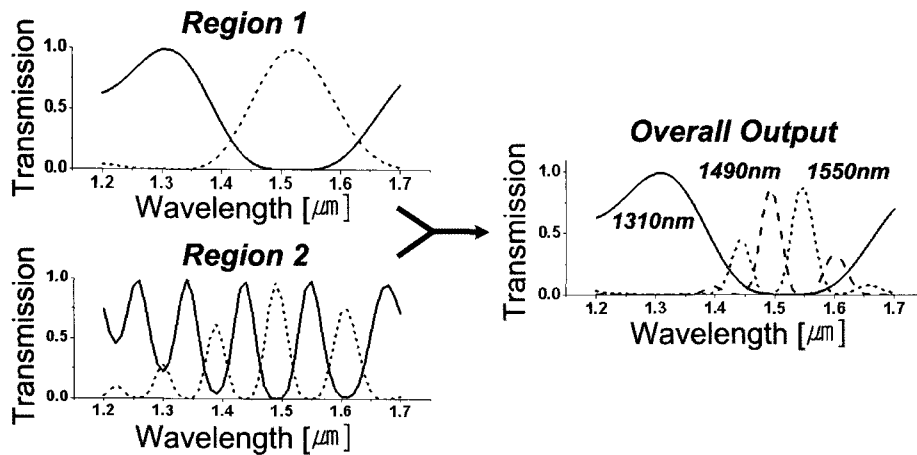


그림 3. 각 영역에서의 파장분리특성, 여기서 ΔL_1 은 $3.13 \mu\text{m}$, ΔL_2 는 $13.3 \mu\text{m}$.

면 광도파회로 기반의 트라이플렉서를 구현할 수 있다. 이와 같이 구현되는 트라이플렉서에서 방향성 결합기는 도파로의 너비 또는 높이가 $0.2 \mu\text{m}$ 정도 오차가 있더라도, $1480 \text{ nm} \sim 1560 \text{ nm}$ 대역에서는 50 : 50에 가까운 파워 분리 특성을 유지하기 때문에 공정오차에 상당히 둔감하게 구현할 수 있어서 반도체 공정을 이용하여 대량생산이 용이하다.

본 논문에서 설계된 트라이플렉서는 코어와 클래딩의 상대 굴절률차가 0.75%인 일반적인 실리카 도파구조를 채택하고, 광섬유와의 모드매칭 효율과 실제 공정의 적합성을 고려하여 도파로의 높이와 폭은 각각 $6 \mu\text{m}$ 로 설정하였다. 소자의 총 길이는 3.2 cm 이고 곡선도파로들의 곡률반경은 각각 1 cm 를 갖도록 설계하였다. 그림 3에 이와 같은 파라미터를 가진 트라이플렉서의 영역 1에서 1310 nm 대역과 $1480 \text{ nm} \sim 1560 \text{ nm}$ 대역이 분리되는 특성을 보였고, 영역 2에서 1490 nm 대역과 1550 nm 대역이 분리되는 특성을 나타내었다. 또한 전체 트라이플렉서의 파장 투과특성도 같이 나타내었다.

III. 시뮬레이션 결과

그림 4는 트라이플렉서의 각 파장에 따른 출력을 나타낸 그래프이다. 이는 삼차원 BPM으로 계산한 방향성 결합기 특성 테이블(파장에 따른 Bar 상태 출력 및 Cross 상태 출력 특성)을 구성한 다음, 마하젠더 간섭계 구조를 통해 전달되는 광파의 위상과 진폭의 변화를 전승행렬방법을 통해 분석하였다.

도파로 내의 손실을 고려하지 않았을 경우 두 Downstream 채널(1490 nm , 1550 nm) 사이의 누화 값은 -27.4 dB 보다 작고, Upstream 채널(1310 nm)에서는 -55.2 dB 의 매우 낮은 누화특성을 확인하였다. 또한 Downstream 채널의 삽입손실은 0.5 dB , Upstream 채널에서는 0.1 dB 로 나타났다. 가입자로부터 송출되는 상향데이터 파장(1310 nm)의 경우에는 $\pm 20 \text{ nm}$ 의 파장변화에도 -28 dB 의 누화 값을 유지하면서 잘 분리

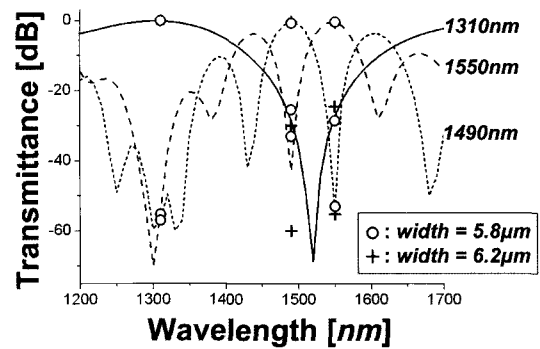


그림 4. 도파로 폭 변화에 따른 트라이플렉서의 파장대 출력 특성.

됨을 알 수 있었다. 이러한 특성으로 인하여 가입 단말을 구성하는데 있어서 저가의 송수신 모듈로 구성이 가능함을 예측할 수 있다.

그림 4는 도파로 폭의 변화에 따른 트라이플렉서의 출력의 변화를 나타낸다. 도파로 폭이 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 변화하여도 Downstream 채널 사이의 누화 값은 -24.5 dB , Upstream 채널과 두 Downstream 채널 사이의 누화 값은 -55 dB 이하로 유지됨을 알 수 있다. 이때 도파로의 폭과 높이 중 어느 하나만 변화할 경우 도파구조는 비대칭적인 형태를 갖게 되며, 이는 각각의 편광특성에 따라 3-dB 방향성 결합기의 출력특성 및 마하젠더 간섭 구조의 간섭특성이 편광에 따라 달라질 우려가 있다. 따라서 본 논문에서는 도파로 폭이 변화할 경우 광 결합기의 TE, TM 편광 특성을 삼차원 준 벡터 BPM을 사용하여 분석하고, 트라이플렉서에서 각 채널의 누화 값을 표 1에 나타하였다. 도파로의 폭이 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 정도 변화하는 경우에는 편광에 거의 무관한 특성을 보임을 알 수 있다.

도파로의 폭과 높이가 동시에 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 변화할 때 제안한 트라이플렉서의 출력특성을 그림 5에 보였다. 도파로 폭의 변화만 고려했을 경우와 마찬가지로 누화 특성이 크게 변하지 않음을 확인할 수 있다.

실제 실리카도파로를 제작할 때 빠른 속도로 클래딩을 형

표 1. 도파로 폭 변화에 따른 트라이플렉서의 편광특성

	Channel Crosstalk [dB]			
	TE		TM	
	W = 5.8	W = 6.2	W = 5.8	W = 6.2
1310 nm port	-55.2	-55.2	-55.2	-55.2
1490 nm port	-25.76	-29.93	-25.64	-29.94
1550 nm port	-28.57	-24.24	-28.58	-24.34

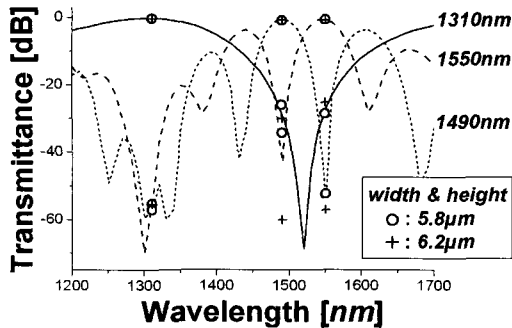


그림 5. 도파로 폭과 높이의 변화에 따른 트라이플렉서의 파장대 출력 특성.

성하기 위해 FHD(flame Hydrolysis Deposition)방법을 사용한다. 이때 열처리 공정과정에서 실리카 광도파로와 실리콘 기판 사이에 스트레스가 발생하며 제작된 소자의 편광특성을 변화시킬 수 있다. 이러한 스트레스는 결국 TM 모드에서의 상대굴절률의 증가를 야기하며, 제안한 트라이플렉서의 각 채널의 누화특성에 영향을 미칠 가능성이 있다.

그림 6과 같이 코어의 사이즈가 $6\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$ 이고 클래딩의 전체 두께는 $50\ \mu\text{m}$ 이며 상부클래딩 높이를 $25\ \mu\text{m}$, 크리스탈 실리콘 웨이퍼의 두께를 $0.7\ \text{mm}$ 로 가정하면, 압축응력 (compressive stress)에 의한 복굴절(birefringence)은 4×10^{-4} 의 값을 갖는다.^[10] 이 경우 삼차원 준 벡터 BPM으로 연산된 TE 모드의 유효굴절률 값에 스트레스에 의한 복굴절률의 변화 값을 적용하여 TM 모드에서 트라이플렉서의 출력특성을 구하면, 그림 7과 같이 파장 축에서 TE 모드에 비해 $0.4\ \text{nm}$ 이동됨을 알 수 있다. 이때의 누화 값의 변화는 Upstream 채널에서는 변화가 없었으며, 두 Downstream 채널에서는 $0.2\ \text{dB}$ 로 매우 작게 나타났다. 따라서 제안한 트라이플렉서는 제작 시 발생할 수도 있는 스트레스에 의한 복굴절에도 불구하고 편광에 무관한 특성을 보일 것임을 예측할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 복잡한 조립 공정을 요구하는 기존의 트라이플렉서와 다르게 평면 광도파회로 기반의 소자로 설계하였고, 그 특성을 시뮬레이션을 통해 살펴보았다. 마하젠더 암의 길이 차이는 $1310\ \text{nm}$ 대역에 적정화하고, $3\ \text{dB}$ 커플러는 $1480\ \text{nm} \sim 1560\ \text{nm}$ 대역에 적정화함으로써 광대역에 걸쳐서 $1310\ \text{nm}$ 와 $1480\ \text{nm} \sim 1560\ \text{nm}$ 파장 대역을 안정적

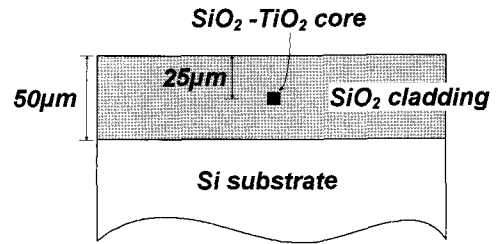


그림 6. 도파구조.

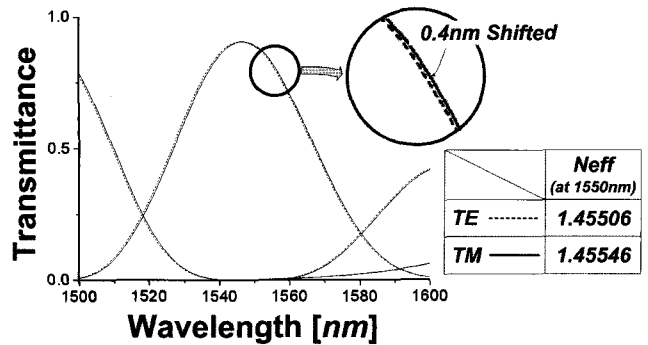


그림 7. 편광에 따른 트라이플렉서의 출력 특성의 변화.

으로 분리하며, 채널 간 누화를 작게 하기 위하여 마하젠더 간섭 구조를 이중으로 반복하여 설계하였다. $1480\ \text{nm}$ 와 $1550\ \text{nm}$ 대역을 분리하기 위하여 두 단의 마하젠더 간섭계를 추가하였다. 제안한 트라이플렉서에서 두 Downstream 채널($1490\ \text{nm}$, $1550\ \text{nm}$) 사이의 누화 값은 $-27\ \text{dB}$ 보다 작고, Upstream 채널($1310\ \text{nm}$)에서는 $-52\ \text{dB}$ 의 매우 낮은 누화특성을 확인하였다. 그리고 실제 공정에서 도파로 폭과 높이가 $\pm 0.2\ \mu\text{m}$ 변하여도 원하는 누화 값이 유지될 수 있고, 가입자로부터 송출되는 상향데이터 파장대역($1310\ \text{nm}$)에서는 $\pm 20\ \text{nm}$ 의 파장변화에도 잘 분리됨을 알 수 있었다.

제안한 트라이플렉서의 제작공정이 확립된다면, 추가적인 박막 필터 조립 공정을 제거함으로써 수율이 상당히 향상되어 트라이플렉서 모듈의 저가화에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단 특정기초연구비(R01-2006-000-10751-0) 지원에 의하여 수행되었음. 이 논문은 2007년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

[1] H. Shinohara, "Broadband Access in Japan: Rapidly Growing FTTH Market," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 43, No. 9, pp. 72-78, September 2005.
 [2] J. Ahn, Y. Lee, K. Kwak, D. Shin, S. Kim, and T. Kim, "Development of a Novel and Cost-effective Bi-directional Optical Triplexer," *IEEE Electronic Components and Tech-*

- nology Conference 2004, pp. 1396-1399, 2004.
- [3] M. Yanagisawa, Y. Inoue, M. Ishii, T. Oguchi, Y. Hida, H. Izumita, N. Araki, and T. Sugie, "Low-loss and compact TFF embedded silica waveguide WDM filter for video distribution services in FTTH systems," in *OFC 2004*, Los Angeles, CA, February 2004, pp. TuI4.
- [4] S. Kim *et al.*, "Low-Crosstalk Design of 1.25 Gbps Optical Triplexer Module for FTTH Systems," *ETRI Journal*, Vol. 28, No. 1, February 2006.
- [5] X. Li, G.-R. Zhou, N.-N. Feng, and W. Huang, "A Novel Planar Waveguide Wavelength Demultiplexer Design for Integrated Optical Triplexer Transceiver," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 17, No. 6, pp. 1214-1216, June 2005.
- [6] Jeong Hwan Song *et al.*, "Bragg Grating-Assisted WDM Filter for Integrated Optical Triplexer Transceivers," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 17, No. 12, December 2005.
- [7] George T. Kanellos *et al.*, "All-Optical 3R Burst Reception at 40 Gb/s Using Four Integrated MZI Switches," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 25, No. 1, January 2007.
- [8] C. Kostrzewa, R. Moosburger, G. Fischbeck, B. Schüppert, and K. Petermann, "Tunable Polymer Optical Add/Drop Filter for Multiwavelength Networks," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 9, No. 11, November 1997.
- [9] A. Takagi *et al.*, "Silica-Based Waveguide Type-Wavelength-Insensitive Coupler (WINC's) with Series-Tapered Coupling Structure," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 10, pp. 1814-1824, 1992.
- [10] Akio Sugita, Kaname Jinguji, Norio Takato, and Masao Kawachi, "Laser-Trimming Adjustment of Waveguide Birefringence in Optical FDM Components," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 8, No. 6, August 1990.

Design and Analysis of Mach-Zehnder-Interferometer-Based Silica Planar Lightwave Circuit Triplexer

Taehyung Lee, Donghyun Lee, and Youngchul Chung[†]

Department of Electronics and Communications Engineering, Kwangwoon University, Seoul, Korea

[†]*E-mail: ychung@kw.ac.kr*

(Received October 9, 2007, Revised manuscript November 7, 2007)

A triplexer based on a silica planar lightwave circuit Mach-Zehnder interferometer (MZI) is proposed and its characteristics are analyzed through simulations. To separate 1310 nm band and 1480~1560 nm band properly, the path length difference of an MZI is set to be the multiple and half of the wavelength 1310 nm and the balance of the directional coupler is optimized in the 1480~1560 nm band. The same MZI is additionally cascaded to provide good crosstalk characteristics. The 1490 nm band and 1550 nm band are further separated using additional two stage MZI's. A three-dimensional BPM and transfer matrix method analysis predicts the low crosstalk characteristics and the fabrication-error-tolerance of the proposed triplexer.

OCIS code : 230.7390, 160.6030, 130.0130, 120.2440.