

## 정렬에 무관한 마이크로옵틱 마하젠더 간섭계형 필터

이종훈<sup>†</sup> · 김현덕 · 송재원

경북대학교 전자전기컴퓨터공학부  
Ⓣ 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370 E10-918

(2006년 4월 19일 받음, 2006년 6월 12일 수정본 받음)

광섬유형 콜리메이터와 광 진행 경로의 수직 방향으로 삽입된 주기적으로 식각된 줄무늬(stripe) 평판에 의해 진행되는 빔의 일부에 광 경로차를 유도하는 마이크로 옵틱형 마하젠더 간섭계형 필터를 제안하고 구현하였다. 제안된 마이크로 옵틱 필터는 주기적으로 식각된 줄무늬(stripe) 구조의 평판을 빔 경로에 삽입하여 측방향 정렬에 무관하게 특정 소멸비 값 이상의 특성을 구현할 수 있으며, 식각된 박막의 두께를 조정함으로써 원하는 대역폭 및 주기의 전달특성을 가지는 필터를 구현할 수 있다. 네거티브 포토레지스터인 SU-8을 기반으로 줄무늬(stripe) 구조의 주기적으로 식각된 평판을 제작하였으며 이를 이용하여 구현된 필터의 소멸비는 측방향 정렬에 무관하게 30 dB이상의 값을 가진다. 제작된 필터의 FSR(Free Spectral Range)은 장파장 대역에서 약 237 nm이고 그리고 삽입손실은 2 dB 미만의 값을 가진다. 통과대역에서의 PDL(Polarisation Dependent Loss)값은 0.15 dB 미만이다.

주제어 : Mach-Zehnder interferometric filter, Micro-Optic filter, WDM filter.

### I 서 론

파장분할 다중방식(WDM : Wavelength Division Multiplexing) 광전송 시스템이 활성화 되면서 여러 가지 다양한 형태의 필터들이 시스템에 적용되고 있다. 특히 통과대역이 파장 응답 특성을 가지는 광 필터들은 파장분할 다중방식 광전송 시스템과 같이 일정한 간격의 파장이 다른 광신호들을 다중화하여 전송하는 시스템에서 각 채널의 파장 제어, 다중화된 광신호의 품질 감시, 광증폭기 잡음광 누적 제거, 양방향 광전송 시스템에서 반사로 인한 신호 열화 방지 등을 위해 사용되고 있다. 또, 비교적 반복 주기가 긴 광 필터는 파장 가변 필터나 광증폭기의 이득 평탄화 등을 위해 사용되고 있다<sup>[1-5]</sup>.

이러한 필터들은 다양한 원리로 구현되는데 평판에 여러 층의 유전체 막을 형성하는 다층 박막형(Thin Film) 필터, 마하젠더(Mach-Zehnder)나 사그냐크(Sagnac), 마이켈슨(Michelson) 그리고 패브리페로(Fabry-Perot) 간섭 현상을 이용하는 간섭계형 필터, 매우 많은 수의 주기적인 굴절률 변동을 이용한 격자(Grating)필터 등이 있다. 그 중 마하젠더 간섭계형 필터는 선형적인 위상특성과 넓은 대역특성으로 고속 파장분할다중화(Wavelength Division Multiplexing) 시스템에 적합한 필터로 널리 알려져 있다<sup>[6]</sup>.

마하젠더 간섭계형 필터는 구현 방식에 따라 반도체 평면 공정을 이용한 집적광학형, 광섬유의 용착 접속 방식에 기반한 광섬유형 소자, 콜리메이터를 기반으로한 마이크로 옵틱

형 등이 있다. 특히 콜리메이터 기반의 마이크로 옵틱형 마하젠더 간섭계형 필터는 낮은 삽입 손실, 편광 무의존성 등의 우수한 광특성과 쉬운 구성으로 다양한 응용이 가능하다고 알려져 있다<sup>[7,8]</sup>. 하지만 부가적인 측방향 정렬 조건과 안정도 문제로 널리 사용되지 못하고 있다. 즉, 제작 방식과 구조는 간단한데, 실제적인 상용화에는 별도의 측방향 정렬 문제가 있기 때문에 상용화 및 대량 생산시 문제가 된다. 좀 더 상술하면 원하는 특성을 얻기 위해 콜리메이터를 최소 손실이 되게 정렬한 다음 평판을 광 경로의 수직 방향으로 삽입하여 원하는 특성을 가지도록 측방향 정렬을 수행하고 이를 고정하게 되는데, 현재 엄격한 통신소자의 요구조건을 만족하게 하기 위해 마이크로 옵틱 소자의 정렬에서 접착제 고정 방식(epoxy bonding)이나 납땀(soldering)을 수행하게 되고 이로 인해 정렬의 뒤틀림이나 특성 열화가 발생하게 된다. 또 각각의 개별 소자의 정렬시 광원과 파장응답 측정 장치인 스펙트럼 분석기 같은 고가의 장비를 이용, 매번 소멸비 특성을 확인하면서 정렬을 수행하여야 하므로 양산이 어렵게 된다. 이는 상용 제품화에서 요구되는 재현성(reproducibility), 안정성(stability), 특성의 균일성(uniformity) 등의 요구조건을 만족하는데 많은 부가적인 비용과 시간이 소모되므로 현실적인 양산 체제의 구축이 거의 불가능한 실정이다.

본 논문에서는 기존의 마이크로 옵틱형 마하젠더 필터에서의 정렬 문제를 해결한 새로운 형태의 필터를 제안하고 구현하였다. 제안된 필터는 기존의 측방향 정렬 문제를 해결하여 평판의 삽입 위치에 무관한 특성을 얻을 수 있다.

<sup>†</sup> E-mail: joyul@ee.knu.ac.kr, alfred@ee.knu.ac.kr

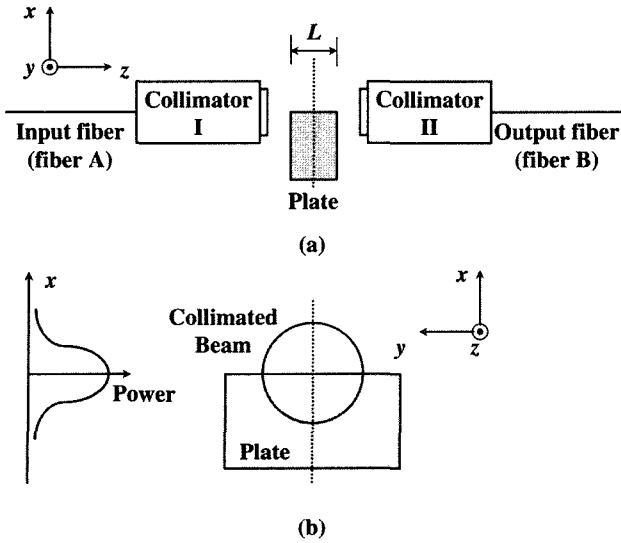


그림 1. 기존의 마이크로 옵틱 마하젠더 간섭계형 필터의 구조 (a) 전체 구성도 (b) 빔 경로에 삽입된 평판과 입출력 빔과의 가상 정렬 단면도.

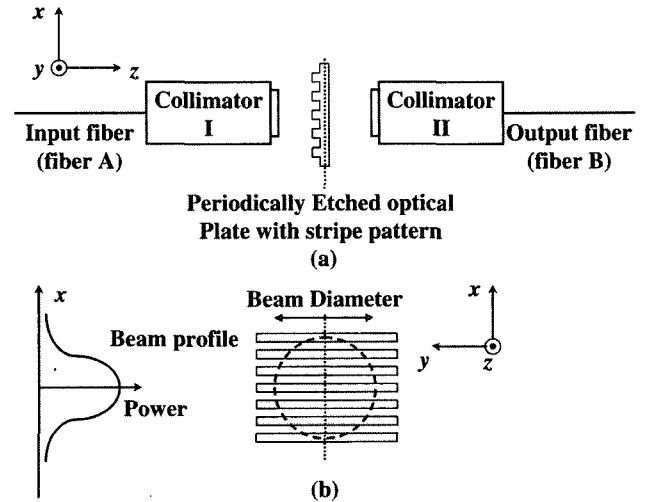


그림 2. 제안된 정렬에 무관한 마이크로 옵틱 마하젠더 간섭계형 필터의 구조 (a) 전체 구성도 (b) 빔 경로에 삽입된 주기적으로 식각된 줄무늬(stripe) 패턴의 평판과 입출력 빔과의 가상 정렬 단면도.

## II. 본 론

### 2.1 구조 및 동작 원리

일반적인 마하젠더 간섭계형 광 필터들은 입력단과 출력단에 각각 Y가지(Y-branch)형 파워 분할기와 결합기를 사용하며, 파워 분할기에 의해 경로가 분할된 빔들 사이에 경로 차이를 유도하고 파워 결합기에서 빔들이 결합되는 과정에서 발생하는 간섭현상을 이용하여 구현한다. 기존의 마하젠더 간섭계의 마이크로 옵틱형 구성은 <그림1>과 같이 두 개의 광섬유형 콜리메이터와 하나의 평판으로 구성되며, 두 콜리메이터 사이에 평판이 삽입되도록 정렬된다.

두 콜리메이터 사이에 삽입된 평판은 x축 방향 삽입 깊이에 따라 평판을 통과한 빔과 그렇지 않은 빔 사이에 위상차를 초래하여 두번째 콜리메이터에서 두 빔이 집속되는 과정에서 마하젠더 간섭계가 형성되도록 한다. 이러한 위상차는 빔의 파장에 따라 달라지므로 평판의 굴절률과 두께(L)에 따라 파장에 주기적으로 반복되는 필터 특성을 가진다. 간섭현상은 평판의 두께와 굴절률, 그리고 삽입 깊이에 따라 달라지며, 마하젠더 간섭계형 광필터의 전달특성(T)은 아래(수식1)과 같다<sup>[7,8]</sup>.

$$T = 1 - e^{-\sin^2 \frac{(n-1)L}{l}} \quad (1)$$

여기서 n과 L은 각각 삽입되는 평판의 굴절률과 두께를 나타내며, λ는 동작파장을 나타낸다. 필터에서 소멸비는 필터의 전달특성에서 통과대역 최대치와 최소치의 비율로 정의되는 값으로 소멸비(extinction ratio) 계수 e의 값에 의해 결정된다. 이러한 구조의 필터에서 소멸비는 빔 진행 경로에서

의 평판의 상대적인 위치에 따라 달라지며, 빔 경로에 삽입된 평판이 콜리메이터 사이에 전달되는 빔을 정확히 반으로 나누면 최대의 소멸비가 되며, 그 경우 소멸비계수 e는 1의 값을 가진다. 즉 평판의 상대적인 위치에 따라 이와 같이 원하는 소멸비 특성이 바뀌게 되고, 원하는 소멸비 특성을 얻기 위해서는 정밀한 측방향 정렬이 요구된다. 이는 기존의 마이크로 옵틱 정렬에 부가적인 측방향 정렬이 포함되므로 패키지의 난점이 발생하고 또 다른 안정도 문제를 발생 시킨다.

<그림 2>는 새로이 제안된 정렬에 무관한 마하젠더 필터의 구조이다. 두 콜리메이터 사이에 주기적으로 식각된 줄무늬(stripe)의 평판이 빔 진행 수직방향으로 위치하고, 입출력 광섬유를 통해 진행되는 빔의 일부에 위상차를 유도하게 된다. 식각된 부분을 지나는 빔에 의한 광경로와 식각되지 않은 부분을 지나는 빔에 의한 광경로 사이에 발생하는 상대적인 위상차이로 콜리메이터를 통해 광섬유로 집속될 때 간섭현상이 일어나게 된다. 식각된 부분을 지나는 빔과 식각되지 않은 부분을 지나는 빔 사이의 위상차가 2의 정수배이면 출력 빔의 형태가 입력빔과 동일하다. 그러나 각 경로를 지나는 빔 사이의 위상차가 의 홀의 정수배만큼 발생하게 되면 위상이 반전되어 출력 빔이 고차 모드로 변환하게 되어 출력 광 섬유로 입사시 발산하게 된다. 이러한 위상차이는 평판의 식각 깊이에 의해 결정되며 파장 변화에 대해 주기적으로 반복되는 전달 특성을 가지게 된다. 또 식각된 부분을 지나는 빔과 그렇지 않은 부분을 지나는 빔의 에너지 비에 의해 출력빔이 완전히 소멸간섭을 일으키거나 혹은 일부분만 소멸간섭을 일으키게 되고 이는 최종 출력에서의 간섭 정도를 결정하게 된다. 즉 식각된 부분을 지나는 빔과 그렇지 않은 부분을 지나는 빔의 에너지 비에 의해 출력빔의 일부가 고차모드로 변환하고 그렇지 않은 부분은 기본 모드로 남아 있게

된다. 필터의 소멸비는 입출력의 최대 전달률과 최소전달률 상의 비로 결정되는데, 만약 줄무늬(stripe)가 폭이 빔 크기에 비해 매우 작고 식각된 부분의 폭과 그렇지 않은 부분의 폭 사이의 비인 듀티(duty)가 50:50이라면 평판의 수직 방향 위치에 상관없이 최대의 소멸비를 가지게 된다.

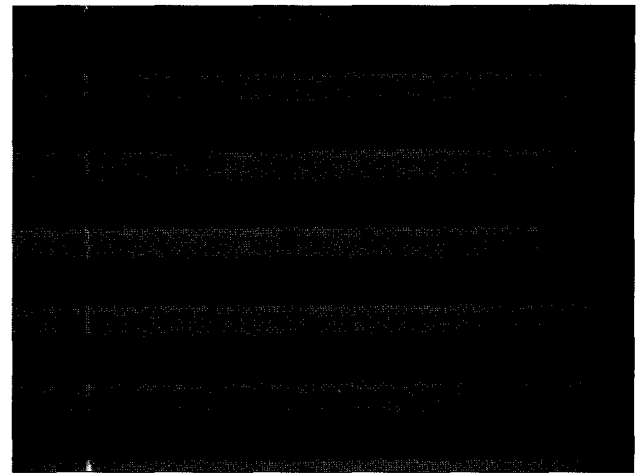
기존의 마이크로 옵틱형 마하젠더 필터의 경우 단일 평판을 빔의 진행경로 수직 방향으로 삽입하여 위상차를 유도하게 되는데 삽입 위치에 따라 소멸비가 변화하게 된다<sup>[7,8]</sup>. 따라서 원하는 소멸비 특성을 얻기 위해서는 정확한 위치의 평판 삽입으로 원하는 위상차를 분할을 수행하게 되는데 이러한 방식은 기존의 다층박막형 필터를 정렬하는 마이크로 옵틱 소자의 정렬에 비해 상대적으로 많은 시간이 걸리고 정렬 시 스펙트럼 특성 측정 장비와 별도의 정렬 기구물 등이 필요하게 된다. 또 제작된 소자의 정렬 민감도에 따라 안정성 문제를 발생시킬 수 있다. 하지만 <그림2>와 같이 제안된 구조는 빔의 진행 방향으로 주기적으로 식각된 줄무늬(stripe)의 평판을 삽입하여 위치에 무관하게 식각된 부분을 통과하는 빔과 그렇지 않은 빔의 비를 일정하게 함으로써 일정한 소멸비 이상의 전달 특성을 얻을 수 있게 한다.

**2.2 실험 및 결과**

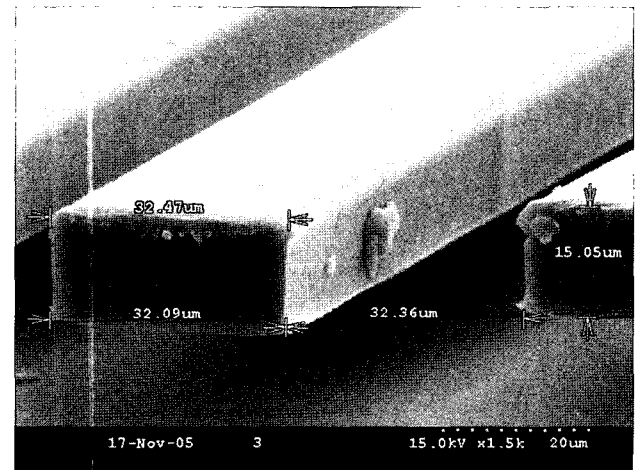
제안된 구조를 검증하기 위해 주기적으로 식각된 줄무늬(stripe) 구조의 평판을 제작하였다. 줄무늬(stripe) 주기가 60 μm이고 폭이 30 μm인 duty 50:50인 마스크를 설계하여 네거티브 포토레지스터(Nega PR)인 SU-8을 이용 제작하였다. SU-8은 MEMS용 애플리케이션 요소기술로 개발된 물질로 높은 열적, 화학적, 기계적 안정도를 가지며, 400 nm 이상의 파장대에서의 투명성, 높은 수직 종횡비(aspect ratio) 등 원하는 형상의 구조물 정밀하게 제작할 수 있는 물질로 잘 알려져 있다. 또 다른 폴리머 물질과 마찬가지로 스펀코터(spin coater)의 회전속도를 조정하여 원하는 두께의 박막을 얻을 수 있으므로 여러 분야에서 널리 사용되고 있다.

주기적으로 식각된 줄무늬(stripe) 패턴의 평판을 제작하기 위한 공정은 MicroChem™사에서 제공하는 표준 공정을 참조하였으며 그 세부 내용은 다음과 같다<sup>[10]</sup>. 두께 500 μm인 Pyrex 유리기판위에 SU-8을 골고루 떨어뜨린 후, 스펀코터(spin coater)의 회전속도 5000 rpm으로 코팅하였다. 코팅된 SU-8을 65 °C에서 5분씩, 10 °C씩 5분 간격으로 증가시키면서 20분 동안 soft baking 시킨 후 온도를 서서히 낮추어 매질의 광학적 특성이 양호하도록 한다. 설계 제작된 마스크 패턴을 Aligner를 이용 코팅된 박막에 최대한 근접시킨 다음 UV 램프를 이용 45초 노광한다. 일반 NegaPR과는 다르게, 노광 후 baking(Post Expose Baking)을 수행하게 되며, 앞의 soft baking과 마찬가지로 65 °C에서 5분씩 단계적으로 95 °C까지 온도를 올리면서 baking후 서서히 온도를 낮추어 준다. 이후 SU-8 현상액(Developer)에 2-3분간 현상 하고 이소프로필 알코올(IPA)을 이용 세척 후 DI water로 세정한다.

<그림 3>은 주기적으로 식각된 stripe 패턴 평판의 현미경



(a)



(b)

그림 3. 제작된 평판의 구조 (a) 주기적으로 식각된 줄무늬(stripe) 평판의 현미경 사진 (b) 전자현미경(SEM) 단면 사진.

사진과 절단면의 전자 현미경 사진(SEM)이다. 식각된 부분과 그렇지 않은 부분의 비가 거의 50:50 이고 수직 종횡비(aspect ratio)가 양호한 특성의 주기적으로 식각된 평판이 제작되었음을 확인할 수 있었다. SEM 상에서 공중에 뜬 줄무늬(stripe) 패턴은 전자 현미경 사진을 찍기 위한 단면 절단시 발생된 오류이며 측정 샘플상 주기의 증가는 줄무늬 패턴을 수직으로 자르지 못해서 발생한 것이다.

제작된 주기적으로 식각된 줄무늬(stripe) 패턴의 평판을 두 콜리메이터사이에 삽입하고 전달특성을 측정하였다. 측정에 사용된 콜리메이터는 빔 직경 500 μm인 C-lens형으로 두 콜리메이터를 1550 nm의 파장에서 최소 손실이 되게 정렬한 후 측정하였다. 측정시 두 콜리메이터의 동작거리는 약 12 mm이며 제작된 평판 소자를 빔 진행 방향의 수직으로 삽입하고 특성을 측정하였다.

<그림4>는 제안된 필터의 전달특성을 백색광원(White Light Source: Anritsu, MZ922A)과 광 스펙트럼 분석기(Optical Spec-

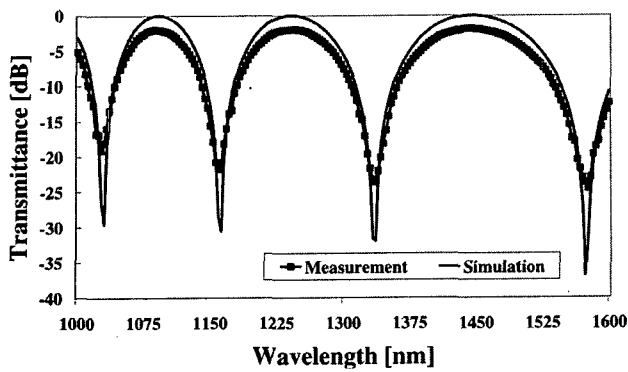


그림 4. 백색광원(White Light Source)으로 측정된 제작된 필터의 투과 스펙트럼 특성. (■ : 측정 결과, — : 전산모의 결과)

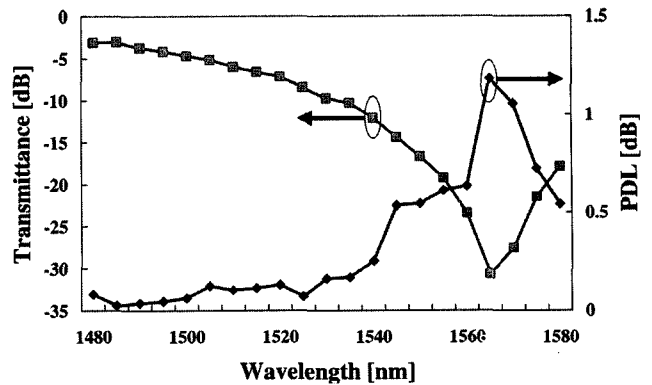


그림 6. 제작된 필터의 편광의존손실(Polarization Dependence Loss) 특성 (■ : 투과 특성(loss), ○ : PDL)

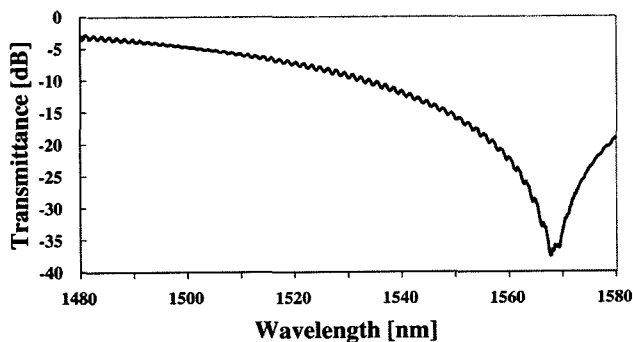


그림 5. 파장 가변 광원(Tunable Laser Source)으로 측정된 제작된 필터의 투과 스펙트럼 특성.

trum Analyser: Ando, AQ6315)를 이용하여 측정한 전달특성 결과와 이론적인 전산모의 결과를 함께 나타낸 그래프이다. 주기적으로 식각된 줄무늬(stripe) 패턴의 평판 삽입에 따른 초손실은 측정 범위는 1000 nm에서 1600 nm사이의 대역에서 2 dB 미만의 값을 가진다. 전달특성의 최대와 최소 사이의 간격 혹은 최소와 최소사이의 간격을 나타내는 FSR(Free Spectral Range)값은 동작파장변화에 따라 달라지는데 SU-8의 분산특성에 기인한 것으로 참고문헌<sup>[10]</sup>의 분산 특성을 기반으로 전산모의 한 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 측정 대역은 1000 nm에서 1600 nm대역에서 광스펙트럼 분석기의 해상도를 10 nm로 측정을 하였으며 최대 소멸비는 측정 한계치까지 측정되었다. 광 스펙트럼 분석기의 해상도는 10 nm로 측정하였으며 이때의 측정 범위 전체에서의 동적 범위(dynamic range)는 약 20 dB의 값을 가진다.

<그림5>는 파장가변광원(Tunable Laser Source)을 이용하여 1480 nm에서 1580 nm 대역에서 0.1 nm의 분해능으로 측정된 파장 전달 특성이다. 측정된 최대 소멸비는 약 35 dB 이상의 값을 가진다. 삽입된 주기적으로 식각된 줄무늬(stripe) 패턴 평판을 빔 수직 방향으로 이동시켰을때도 측방향 위치에 상관없이 최대 소멸비의 변화는 약 2dB미만의 소멸비 변화를 나타내었다. 즉 부가적인 측 방향 정렬 없이도 33 dB 이상의 소멸비 특성을 얻을 수 있다. 투과 특성의 리플은 공

기와 샘플의 경계면에서 발생하는 Fabry-Perot 간섭현상에 기인한 것으로 향후 별도의 무반사 코팅 기법을 적용하여 향상시킬 수 있을 것으로 보인다.

파장가변광원(Tunable Laser Source: Ando AQ 4321A)과 PDL 미터(Polarization Dependent Loss meter: JDS Uniphase, PS3550)를 이용하여 제작된 소자의 편광의존 특성을 측정하였다. <그림6>는 편광의존손실과 투과스펙트럼을 동시에 나타낸 값으로 측정된 통과대역에서 0.15 dB 미만의 값을 가지며, 정지대역에서 최대 1.4 dB미만을 값을 가진다.

### III. 결론 및 검토

본 논문에서는 새로운 구조의 마이크로옵틱 기반의 마하젠더 간섭계형 필터를 제안하고 구현하다. 제안된 구조는 주기적으로 식각된 줄무늬(stripe) 패턴의 평판을 제작, 빔 경로에 삽입함으로써 기존의 마이크로 옵틱 마하젠더 필터와 달리 정렬에 무관하게 일정한 소멸비 이상의 특성을 안정적으로 구현가능하게 한다. 제작된 필터의 삽입손실 2 dB 미만이며, 33dB 이상의 소멸비값을 얻을 수 있었다. 제작된 평판의 측방향 이동에 따른 소멸비의 변화는 2 dB 미만으로 특정 소멸비 이상의 값을 정렬에 무관하게 구현할 수 있었다. 본 논문에서는 최대 소멸비 구현을 위해 줄무늬 패턴의 식각된 부분과 식각되지 않은 부분의 비를 거의 50:50으로 고정하여 최대 소멸비를 구현하였다. 하지만 구현하고자 하는 소멸비에 따라 반복주기의 비(duty)를 조정함으로써 안정적으로 특정 소멸비 특성을 얻을 수 있다. 또 공정의 편이상 주기적인 줄무늬의 반복 구조를 채용하였는데 다른 형태의 주기적으로 반복되는 무늬 패턴으로도 충분히 정렬에 무관하면서 원하는 소멸비 특성을 가지는 필터를 구현할 수 있다.

측정된 편광의존 손실은 통과대역에서 0.15 dB 미만의 값을 가지게 된다. 제안된 구조는 구조적 편광특성을 유도하는 0차 격자(0<sup>th</sup> order grating)구조와 동일한 형태를 가진다<sup>[11]</sup>. 그러나 본 구조는 그 주기가 파장에 비해 매우 큰 구조로 측정된 바와 같이 편광에 거의 무관한 특성을 보이게 된다. 측

정된 2 dB의 삽입 손실은 패브리페로 간섭에 의한 경계면 반사와 매질 자체의 손실 이외에도 격자 구조에 의한 회절 손실, 모드 변환 손실 등이 포함된 결과이다.

본 논문에서 제안된 필터는 광섬유형 콜리메이터 형으로 구현되므로 기존의 다른 방식에 비해 쉽고 안정적으로 제작할 수 있으며 향후 다양한 광응용 소자에 적용 가능할 것이다. 또 본 간섭계 구조를 활용하여 센서 및 측정 등의 여러 광 관련 계측 분야에서도 폭넓은 적용이 가능할 것이다.

### 참고문헌

- [1] C. H. Kim, Y. C. Chung, "2.5Gb/s 16-Channel Bidirectional WDM Transmission System Using Bidirectional Erbium-Doped Fiber Amplifier Based on Spectrally Interleaved Synchronized Etalon Filters", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 11, No. 6, pp. 745-747, Jun. 1999.
- [2] K.J. Park, S.K. Shin, H.C. Ji, H.G. Woo, and Y.C. Chung, "A Multi-wavelength Locker for WDM System", *Optical Fiber Communication Conference 2000*, Vol. 2, pp.73-75, Mar. 2000.
- [3] Hyunjae Lee, G. Y. Lyu, S. Y. Park, and J. H. Lee, "Multichannel Wavelength Locking Using Transmission Peaks of an AWG for Multichannel Optical Transmission Systems", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 10, No. 2, pp. 276-278, Feb. 1998.
- [4] Kyung-Rock Sohn, Jaewon Song, "Tunable in-line fiber optic comb filter using a side-polished single mode fiber coupler with LiNbO3 overlay and intermediate coupling layer", *Optics Communications*, vol.203, pp.271-276, April, 2002.
- [5] H.W. Kwon, N.K. Lee, J.W. Song, "Narrowband LPFG Filter based on a Pair of Fiber deformed", *CLEO/QELS 2001*, pp.262-263, May. 2001.
- [6] G. Lenz, B.J. Eggleton, C.R. Giles, C.K. Madsen, R.E. Slusher, "Dispersive properties of optical filters for WDM systems", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol.34, No.8, pp.1390-1402, Aug. 1998.
- [7] R. A. Betts, S.J. Frisken and D. Wong, "Split-beam Fourier filter and its application in a gain-flattened EDFA", *OFC'95, Technical Digest Series*, Feb. 26-Mar3, pp.80-81, 1995.
- [8] 이종훈, 권형우, 김영철, 김현덕, 송재원, 김보훈, "빔 분할 방법을 이용한 광 Comb 필터", *제 12회 광전자 및 광통신 학술회의 (COOC 2005)*, pp.309-310, FP16, 대구컨벤션, 2005.
- [10] <http://www.microchem.com>
- [11] Andreas G. Andreou, "Optical Waveguides in Silicon", Final project report for 520-773, 2003.
- [12] Rolf. C. Enger and Steven K. Case, "Optical elements with ultrahigh spatial-frequency surface corrugations", *Appl. Opt.*, vol.22, no.20, pp.3220-3228, 1983.

### Align-free Micro-optic Mach-Zehnder Interferometric Filter

Jong Hoon Lee<sup>†</sup>, Hyun Deok Kim, and Jae-Won Song

School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University, 1370, Sankyuk-dong, Puk-gu, Taegu, 702-701, South Korea

<sup>†</sup>E-mail: [alfred@ee.knu.ac.kr](mailto:alfred@ee.knu.ac.kr)

(Received April 19, 2006, Revised manuscript June 12, 2006)

A novel alignment-free micro-optic MZI filter has been demonstrated. The filter is composed of two fiber-pigtailed collimators and a beam-splitting plate with a periodically etched stripe pattern. We fabricated the plate through a standard lithographic formulation process by using a pyrex substrate glass with SU-8 resist coating on its one of the surfaces. The maximum insertion loss of the implemented filter was less than 2 dB over 1000 nm to 1600 nm and the extinction ratio was larger than 33 dB. The measured PDL within the 3-dB pass band of the filter was less than 0.15dB and the maximum extinction ratio variation was less than 2 dB even when the worst alignment error occurred.

OCIS code : 350.3950, 350.2460, 230.3990.