

‘Improved QS-MMI’ 1.31 / 1.55 μm 파장분리기의 최적화 설계 및 제작

김남국 · 김장겸 · 최철현 · 오범환[†] · 이승걸 · 박세근 · 이일향

인하대학교 정보통신공학과

Ⓣ 402-751 인천광역시 남구 용현동 253번지

(2005년 3월 15일 받음, 2005년 6월 16일 수정본 받음)

다중모드간섭 기반의 1.31 / 1.55 μm 파장분리기의 크기 및 성능개선을 위해 ‘Improved Quasi-State’ 불완전 단일상 개념을 설계에 도입하였다. 코어와 클래딩의 굴절률 차이가 작은 경우의 모드간 위상오차를 역이용 하도록 설계하여 ‘Quasi-State’의 출력 파워와 소멸비를 월등히 개선하였다. 다중모드간섭기의 폭이 14.4 μm , 입력도파로의 수평 이동이 5.3 μm 가 되도록 설계된 구조를 유효굴절률법과 MPA를 사용하여 분석한 결과 최대 소멸비는 양 파장대역 모두 -25dB 이하로 나타났다. 설계된 파장분리기는 일반적인 다중모드간섭기의 길이의 1/5정도에 불과한 2620 μm 의 간섭길이를 가진다. 소프트 리소그래피 공정을 통해 설계된 파장분리기를 제작하였으며, 1.31 μm 와 1.5 μm 의 성공적인 파장분리를 확인하였다.

주제어 : Integrated optics, Guided waves, Integrated optics devices.

I. 서 론

정보통신사회에서 고화질의 멀티미디어 서비스, 원격 교육, 화상 회의, 원격 진료 등 사용자의 대역폭에 대한 요구가 폭발적으로 증가하고 있다. 이에 따라 보다 큰 대역폭을 제공할 수 있는 새로운 기술이 필요하게 되었으며 기존에 매설되어 있는 광섬유의 높은 대역폭을 이용한 광통신 기술이 대안으로 생각되고 있다. 광통신 기술에서 높은 대역폭을 얻기 위해 Time Division Multiplexing(TDM), Code Division Multiplexing(CDM), Wavelength Division Multiplexing(WDM) 등 여러 다중화 방법을 사용할 수 있다. 이 중 WDM은 여러 신호들을 각기 다른 파장으로 변조하여 하나의 파이버를 통해 전송하는 기술로서, 여러 파장을 다중화 하기 위해 동작 속도가 빠른 소자를 필요로 하지 않기 때문에 현재의 전자장비의 속도만으로도 파이버의 대역폭을 충분히 활용할 수 있는 장점이 있어서 가장 선호되고 있는 기술이다.^[1] WDM을 이용한 광통신 시스템에서는 다중화된 파장을 분리할 수 있는 파장분리기(demultiplexer)가 필요하고 이러한 소자에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그동안 파장분리기로서 Bragg gratings,^[2] liquid crystal filters,^[3] fiber ring filters,^[4] MEMS systems^[5] 등에 대한 연구가 이루어졌지만 그 크기나 성능면에서 제약이 있다. 이러한 소자들에 비해 다중모드간섭(Multi-Mode Interference, MMI)을 이용한 파장분리기의 경우 손실이 적고 소자 크기가 작으며 제작 허용 오차가 크므로 WDM 시스템에서의 집적화에 유리하다.^[6] 이러한 MMI 파장분리기의 경우, 대부분 III-V 족 화합물 반도체나 LiNbO₃ 등 굴절률이 큰 물질을 사용하여 통상적인 패터닝과 식각을 통해 크기가 작은 소자를 제작하였

으나,^[7,8] 공정이 복잡하고 제작 단가가 비싸다는 단점이 있다. 반면에 이보다는 굴절률이 작은 폴리머를 이용하여 엠보싱 공정으로 MMI 소자를 제작하는 경우 공정 과정은 간단해지고 대량복제를 통해 소자 가격을 낮출수는 있지만 소자의 크기가 커지고 긴 길이로 인해 전파 손실이 발생하는 단점이 지적되어 왔다.

본 고에서는 폴리머 기반의 저굴절률비 구조를 지닌 다중모드 간섭 1.31/1.55 μm 파장분리기의 성능과 크기를 개선할 수 있는 방안을 제안하였다. MMI 영역 안에서는 여러개의 다중모드가 존재하며 다중모드의 간섭에 의해 전파방향을 따라 주기적인 간격으로 빛이 집중되어 단일상 또는 다중상이 나타난다. 이러한 현상을 자아결상원리(Self Imaging Theory)라고 하며, 분리하고자 하는 양 파장대역 중 1.31 μm 파장은 자아결상원리에 의한 일반적인 단일상을 이용하고 1.55 μm 파장은 다중모드 간섭기의 폭이 4-5개의 모드만 존재할 때 발생하는 불완전한 단일상인 ‘Quasi-State’를 이용하여^[9] 기존보다 1/5정도로 짧은 분리길이에서도 효율적으로 두 파장을 분리할 수 있는 소자를 설계하였다. 또한 입력 도파로간의 중심간격과 다중모드간섭기의 폭을 조절하고 저굴절률비에서 나타나는 ‘Improved Quasi-State’를 활용하여 1.31/1.55 μm 의 양 파장대역에서 모두 손실을 줄이고 소멸비 특성을 월등히 개선하였다. 파장분리기의 성능을 확인하기 위하여 유효굴절률법(Effective Index Method)과 Modal Propagation Analysis(MPA)를 사용하였다.

II. ‘Improved Quasi-State’를 이용한 파장분리기의 설계, 제작 및 특성

자아결상원리는 전파상수의 근사를 통해서 정립된 원리로서 필연적으로 다중모드 영역에서의 전파모드는 상호간 규칙에 어긋나는 위상오차를 가지게 되고, 이로 인해 소자의

[†]E-mail: obh@inha.ac.kr

성능 개선에 한계를 가지게 된다. 따라서 위상오차를 줄이기 위해서 많은 연구가 선행되었는데 특히 위상오차는 모드마다 다르며 다중모드간섭기의 폭이나 굴절률비 등에 의해 그 분포 양상이 변하므로 이들을 적절히 조정해서 사용될 모드의 위상오차를 최소화할 수 있도록 많은 노력을 기울여 왔다. 예를 들어, 이러한 위상오차 조절에 있어 index contrast를 최적화 하고자 하는 연구가 Huang *et al.*,^[10] Rui Yin *et al.*^[11] 등에 의해 보고되었는데 이들은 주로 소자의 크기를 줄이거나, 입출력 도파로간의 광 결합을 최소화하기 위해 고굴절률비 구조에 대한 연구를 하였다. 한편, 모든 전파모드에 대해 위상오차를 줄이기 위해 간섭기내 최고차 모드의 위상오차를 최소화를 시키는 것이 필요하다고 생각되어졌으나 모드차수에 따라 위상오차가 단순히 증가하지 않으며 간섭기 폭과 클래딩의 굴절률에 따라 그 변화 경향이 바뀌므로 최고차 모드의 위상오차를 최소화 하는 것보다는 전체모드를 고려한 최적화 방법이 필요하다. 이러한 최적화 방법의 일환으로 위상오차 한계 범위를 설정하고, 각 모드의 위상오차가 그 한계범위 내에 드는 모드가 많도록 하기 위해 최적의 클래딩 굴절률을 정하는 방법과 대표모드의 차수를 최고차 모드의 약 3/4으로 두고, 이 대표모드의 위상오차를 0으로 조절하는 방법에 대한 연구가 Hong *et al.*^[12]에 의해 진행되었다. 하지만, 이러한 방법은 실제 소자의 제작시 최적 굴절률을 가진 재료를 선택하기 어려우며, 소자의 길이가 길어지는 단점이 있다.

위와 같은 단점들을 해결하기 위해 본 고에서는 ‘Improved Quasi-State’ 개념을 설계에 도입하였다. 다중모드영역의 폭에서 4개의 모드만 존재하고 4개의 모드 사이의 여기계수가 특정 조건을 만족하면 자아결상원리에 의한 일반적인 단일상 외에 불완전한 단일상들이 발생하기 시작한다.^[13] 일반적으로 다중모드영역에서 존재하는 모드의 수가 많으면 자아결상원리에 의한 단일상이 잘 나타나며 주위의 불완전한 단일상들은 거의 발생하지 않는 경향이 있다. 그에 반해 다중모드영역의 폭이 좁아질수록, 다시 말해서 다중모드영역내의 모드 수가 작아질수록 자아결상원리에 의한 단일상 외에 불완전한 단일상이 나타나기 시작하는데 4개 정도의 모드만 존재하면 이러한 불완전한 단일상은 자아결상 원리에 의한 단일상과 비슷한 형태와 강도로 나타난다. 불완전 단일상을 확인하기 위하여 파장이 1310 nm이고 TE 편광된 빛을 MPA를 사용하여 분석하여 보았다. 다중모드 영역 안에서 진행거리에 따른 광 파워의 세기를 살펴보면 그림 1와 같이 주어진다.

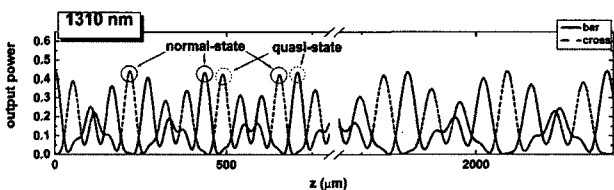
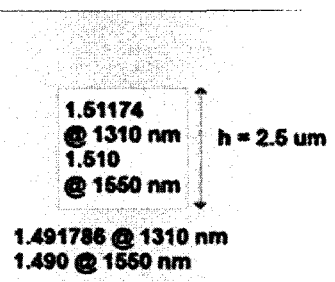


그림 1. 다중모드 영역 안에서 진행거리에 따른 광세기 변화. MPA를 사용하였으며 이때 사용된 빛은 파장이 1310nm이고 TE 편광되어 있다.

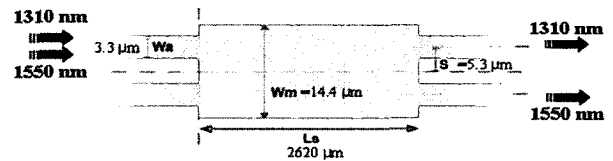
여기에서 자아결상원리에 따른 일반적인 단일상을 ‘Normal-State’라고 정의하였고, 그 앞뒤로 형성되는 불완전 단일상을 ‘Quasi-State’라고 정의하였다. ‘Normal-State’는 형성주기가 $3L_{\pi}$ 임에 반하여 ‘Quasi-State’는 각 ‘Normal-State’의 앞뒤로 $3L_{\pi}/5$ 의 길이만큼 떨어져 형성된다. 일반적으로 MMI를 이용하여 파장을 분리하는 경우에는 ‘Normal-State’만 이용하는데 반해 ‘Quasi-State’와 ‘Normal-State’를 사용하면 서로 형성주기가 다름을 이용하여 파장의 분리길이를 1/5로 줄일 수 있다. 한편, ‘Quasi-State’상의 크기는 굴절률비에 따라 변한다. 고굴절률비에서는 다중모드영역을 진행하면서 ‘Normal-State’의 앞에 있는 ‘Quasi-State’의 크기가 커지는 반면에 저굴절률비에서는 ‘Normal-State’의 뒤에 있는 ‘Quasi-State’의 크기가 커지는 경향을 보인다. 고굴절률비에서 나타나는 ‘Quasi-State’는 ‘Normal-State’에 비해 30%정도의 파워 손실을 지니는데 반해 저굴절률비에서 나타난 ‘Quasi-State’는 구조 변수 최적화를 통해 10% 이하의 파워 손실만 가진다. 이러한 불완전 단일상을 ‘Improved Quasi-State’라고 정의하였고, 이를 이용할 경우 MMI 소자의 손실과 균일도(uniformity), 소멸비(extinction ratio)를 개선시킬 수 있다.

설계된 도파로의 단면 구조는 그림 2(a)에 나타내었다. 도파로층 부분의 두께는 2.5 μm이고 굴절률이 1.512(파장 1.31 μm), 1.510(파장 1.55 μm)인 물질을 사용하였으며, 클래딩 부분은 굴절률이 1.492(파장 1.31 μm), 1.490(파장 1.55 μm)인 물질을 사용하였다.

한편 위와 같은 구조에서 두 파장에서의 맥동길이 L_{π} 는 각각 424, 386 μm으로 주어지는데, 같은 분리길이에서 두 파를 분리하기 위해서는 분리되는 위치, 즉 빛이 다중모드영역의 길이만큼 진행했을 때 생기는 이중상의 위상차이를 π 의 홀수배가 되도록 해줘야 한다. ‘Normal-State’만을 사용한 파장분리기의 경우 분리길이가 $p \times (3L_{\pi,1310}) = q \times (3L_{\pi,1550})$ (p, q 는 정수)을 만족해야 한다. 다중모드 폭이 14.4 μm인 경우에 대하여



(a) 도파로의 단면구조



(b) MMI 파장분리기의 모식도

그림 2. MMI 파장분리기의 구조

$p=10, q=11$ 을 만족하며 분리길이는 식 (1)과 같이 주어지는데, 이때 $1.31 \mu\text{m}$ 파장은 bar 도파로로, $1.55 \mu\text{m}$ 파장은 cross 도파로로 출력된다.

$$10 \times (3L_{\pi, 1310}) = 11 \times (3L_{\pi, 1550}) \approx 12700 \mu\text{m} \quad (1)$$

반면에 $1.31 \mu\text{m}$ 파장 대역은 'Normal-State'를 사용하고 $1.55 \mu\text{m}$ 파장은 'Normal-State'를 뒤쪽에 있는 'Improved Quasi-State'를 사용하면 두 파장 모두 'Normal-State'를 이용하는 경우인 $12700 \mu\text{m}$ 보다 약 1/5에 불과한 짧은 분리길이를 가진다. 두 파장대역에서의 진행방향에 대한 광세기를 그림 3에 나타내었으며 $2620 \mu\text{m}$ 에서 두 파를 효과적으로 분리할 수 있다.

이때, 'Quasi-State'를 이용한 설계는 맥동길이의 특정한 비율을 필요로 하는 점에 유의하여야 하며, 필요한 조건들과 그 특성을 표 1에 정리하였다. 본 연구의 구조에서 $14.4 \mu\text{m}$ 의 간섭기 폭은 표 1의 $5n(5n+1)$ 의 조건을 만족하는 10:11의 맥동길이 정수비임을 알 수 있다. 이 때의 소멸비 특성은 그림 4와 같다.

$1.31 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$ 파장에 대하여 $2620 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$ 의 분리길이에서 모두 25 dB 정도의 우수한 특성을 보이고 있으며, excess loss도 두 파장 모두 1 dB 이내로 계산되었다. 또한 $1 \mu\text{m}$ 내의 길이 공정오차를 고려하더라도 제작된 소자의 성능에 큰 영향을 주지 않을 것으로 생각된다.

한편 $1.31 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$ 파장에 대한 대역폭의 계산 결과를 그림 5에 나타내었다. $2620 \mu\text{m}$ 의 분리길이는 유지한 채 각각의 중심파장이 $1.31 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$ 인 경우에 대하여 파장을 변화시키면

표 1. 'Quasi-State' 발생을 위한 맥동길이의 비율

	Mode condition	Beat length ratio	Split length
Normal - Normal	×	m : n	L_s
Quasi - Normal	4 mode interference & symmetric coefficients	$(5n-1) : 5n$	$1/5 \times L_s$
Normal - Quasi		$5n : (5n+1)$	$1/5 \times L_s$
Quasi - Quasi		$(5n-1) : (5n+1)$	$2/5 \times L_s$

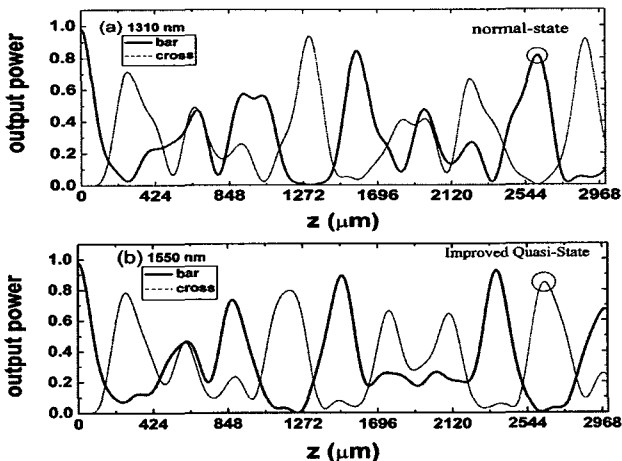
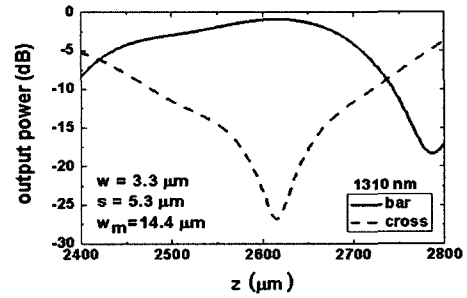


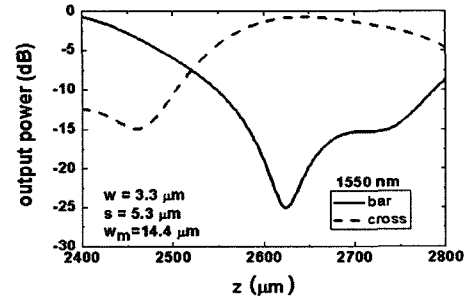
그림 3. 진행거리에 따른 출력파워 변화.

서 그에 따른 출력 광파워를 살펴보았다.

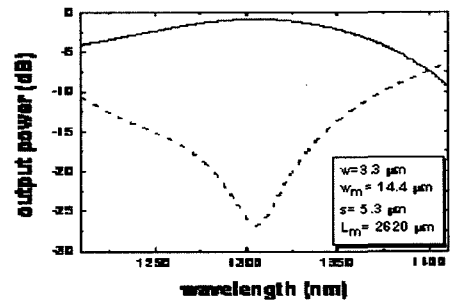
일반적으로 다중모드간섭을 이용한 소자는 파장에 의존하는 특징이 있어 다른 소자에 비해 대역폭이 상대적으로 작은 것으로 알려져 있다. 하지만, 본 파장분리기는 그림 5에서 알 수 있듯이 중심파장이 각각 $1.31 \mu\text{m}$, $1.55 \mu\text{m}$ 인 경우에 대해 이용하는 단일상의 종류에 따라서 소멸비 변화 경향이 다르게 나타난다. 그림 5(b)와 같이 'Normal-State'를 이용한 1.31



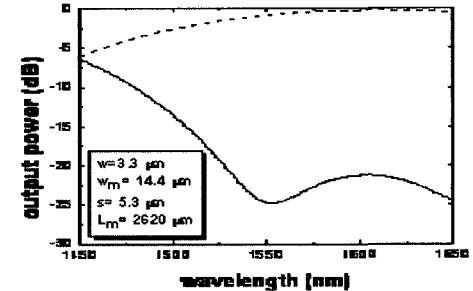
(a) $1.31 \mu\text{m}$ 파장의 출력파워 변화



(b) $1.55 \mu\text{m}$ 파장의 출력파워 변화
그림 4. 소멸비 변화.



(a) 중심파장 $1.31 \mu\text{m}$ 의 대역폭 변화



(b) 중심파장 $1.55 \mu\text{m}$ 의 대역폭 변화
그림 5. 중심파장에 따른 대역폭 변화.



(a) core의 패턴 이미지 (200X) (b) 1.31 μm 파장대역의 근접장 패턴 (c) 1.55 μm 파장대역의 근접장 패턴
그림 5. 제작된 소자의 이미지와 근접장 패턴.

μm 대역보다 ‘Improved Quasi-State’를 사용한 1.55 μm 대역에서 높은 소멸비를 유지하면서 더 넓은 대역폭을 갖는다.

설계된 파장분리기 제작을 위하여 소프트 리소그래피를 통한 엠보싱 공정을 사용하였다. 포토 리소그래피를 사용하여 도파로 형상을 패터닝하고 PDMS를 부어서 몰드를 제작하였다. 제작된 몰드에 core물질을 채우고 under cladding layer가 형성되어있는 유리기판에 몰드를 덮고 경화시킨 후 PDMS 몰드를 제거하고 upper cladding layer를 형성시킨다. 최종적으로 제작된 소자의 모양은 그림 6(a)에서 확인할 수 있다.

제작된 소자에 빛을 입사시켜 CCD카메라를 이용하여 출력단의 근접장 패턴(near field pattern)을 살펴보았다. 그림 6(b), (c)와 같이 1.31 μm 파장은 왼쪽 도파로, 1.55 μm 파장은 오른쪽 도파로로 분리되고 있는 모습을 볼 수 있으며, 약간의 빛이 반대편 도파로에서 관측된다. 이러한 원인은 설계와 다른 유효굴절률과 잔유막의 존재가 있다. 제작된 샘플에서 중심과 끝부분의 높이 단차는 약 1 μm 정도인데 이로 인해서 생기는 점진적인 유효굴절률의 변화는 파장분리기의 설계변수 변화를 가져오므로 소자의 성능을 저해하는 요인 중 하나가 될 수 있어 개선 연구가 요망된다.^[14]

이상과 같이 ‘Improved Quasi-State’를 이용한 파장분리기를 설계하고 제작하였다. 소자의 길이를 기존의 소자보다 1/5로 줄였으며, 두 대역의 빛이 분리되는 것을 확인하였다. 일반적으로 WDM-PON에서는 하향신호는 1.55 μm 파장 대역을, 상향신호는 1.31 μm 파장 대역을 사용하는데 하향신호로 쓰이는 1.55 μm 대역에서는 보다 넓은 대역폭을 만족해야 한다. 설계된 소자의 경우 그림 5(b)에서와 같이 파장이 1.55 μm 인 경우 50 nm 이상의 파장 범위에 대해서 반대편 도파로의 손실은 1 dB 이하로 유지하면서 20 dB 이상의 높은 소멸비를 유지하고 균일한 광세기를 지니고 있기 때문에 WDM-PON 시스템에서 트랜시버 모듈로의 응용이 가능하다.

III. 결 론

다중모드간섭기반의 파장분리기에서 ‘Normal-State’를 이용하는 일반적인 설계 방법은 소자의 길이가 길어질 뿐만 아니라 위상오차에 의해 성능이 저하되며 위상오차를 최소화하기 위해 최적 굴절률비를 구하는 방법은 실제 소자를 제작할 때 재료를 선택하기 어려운 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 위상오차 최소화를 위한 노력 없이도 특정 조건을 만족할 때 발생하는

‘Quasi-State’를 이용하여 기존의 소자보다 1/5 정도에 지나지 않는 분리길이를 가지는 1.31/1.55 μm 파장분리기를 설계하고 구현하였다. 또한 일반적인 ‘Quasi-state’는 ‘Normal-state’에 비해 30% 정도의 파워손실을 가지는데 비해 저굴절률비 구조에서 발생하는 ‘Improved Quasi-State’를 통해 파워손실을 줄여서 양 파장대역에서 모두 25 dB 이상의 높은 소멸비를 가지는 설계를 하였다. 이와 같이 설계된 파장분리기는 리소그래피와 엠보싱 과정을 통해 제작하였으며, 두 파장대역의 분리를 확인하였다. 이와 같은 공정방법으로 대량 생산과 저가격의 소자 구현이 가능하고 폴리머 도파로 기반의 광집적회로에 효율적으로 집적될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학재단 우수 연구센터 사업인 집적형 광자기술 연구센터(R11-2003-022-03002-0)의 지원과 산업자원부의 산업기술 개발 사업인 차세대 신기술 개발연구 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Jean-Francois P. Labourdette, “Logically rearrangeable multihop lightwave networks,” *IEEE transactions on commun.*, vol. 39, pp. 1223-1230, 1991.
- [2] K.W. Gaff, F. Ladouceur, J.D. Love, “Two-wavelength planar add/drop WDM filter employing a three-mode coupling bragg grating,” *Electron. Lett.*, vol. 36, pp. 1142-1144, 2000.
- [3] A. Sneh, K.M. Johnson, “High-speed continuously tunable liquid crystal filter for WDM networks,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 1067-1080, 1996.
- [4] N. Nagatsu, A. Watanabe, S. Okamoto, K.-I. Sato, “Performance and node architecture of WDM multiple fiber ring networks,” *IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 2, pp. 931-936, 1998
- [5] L.Y. Lin, E.L. Goldsein, “Micro-electro-mechanical systems (MEMS) for WDM optical-crossconnect network,” in *Proceedings of the Military Communications Conference*, vol. 2, pp. 954-957, 1999.
- [6] B.J. Li, G.Z. Li, E.K. Liu, “Guided-wave Si_{1-x}Ge_x/Si wavelength demultiplexer based on multimode interference.” *Infrared Physics & Technology*, vol. 39, pp. 61-67, 1998.
- [7] J. M. Heaton, R. M. Jenkins, D. R. Wight, J. T. Parker, J. C. H. Birbeck, and K.P. Hilton, “Novel 1-to-N way integrated optical beam splitters using symmetric mode mixing in GaAs/AlGaAs multimode waveguides,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, pp. 1754-1756, 1992.
- [8] Sang-Shin Lee and Sang-Yung Shin, “Fast power transients in WDM optical networks with cascaded EDFAs,” *Electron. Lett.*, vol. 33, pp. 314-315, 1997
- [9] Jung Moo Hong, Hyun Ho Ryu, Soon Ryong Park, Jae

- Wan Jeong, Seung Gol Lee, El-Hang Lee, Se-Geun Park, Deokha Woo, Sunho Kim, and Beom-Hoan O, "Design and Fabrication of a Significantly Shortened Multimode Interference Coupler for Polarization Splitter Application," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, pp. 72-74, 2003.
- [10] J. Z. Huang, Scarmozzino, and R. M. Osgood, "A new design approach to large input/output number multimode interference couplers and its application to low-crosstalk WDM routers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, pp. 1292-1294, 1998.
- [11] Rui Yin, Jianyi Yang, Xiaoqing Jiang, Jin Li, Minghua Wang, "Improved approach to low-loss and high-uniformity MMI devices," *Opt. Comm.*, vol. 181, pp. 317-321 2000.
- [12] 홍정무, 류현호, 오범환, 이승걸, 이일항, 우덕하, 김선호, "Novel design of polarization splitter based on a quasi-state multimode interference coupler," CLEO2002, pp. 194-195, 2002.
- [13] 홍정무, "다중모드 간섭을 이용한 수동형 광소자 설계," 인하대학교 공학석사 학위논문, 2002.
- [14] Yong-Jae Shin, Jeong-Dae Cho and Eung-Suk Lee, "Trend of soft lithography technology," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, vol. 20, pp. 5-11, 2003.

Compact Design and Fabrication of 'Improved QS-MMI' Demultiplexer

Nam Kook Kim, Jang Kyum Kim, Chul Hyun Choi, Beom Hoan O[†],
Seung Gol Lee, Se Gun Park and El Hang Lee

School of Information and Communication Engineering, INHA University, Incheon, 402-751, Korea

[†]*E-mail: obh@inha.ac.kr*

(Received March 15, 2005, Revised manuscript June 16, 2005)

We designed and fabricated a compact multi-mode interference (MMI) wavelength demultiplexer using the concept of 'Improved Quasi-State' modes. The output power and extinction ratio were improved by utilizing modal phase error which is specially occurred in low-index contrast. For a designed demultiplexer, the mode propagation analysis with effective index approximation shows significant improvement of extinction ratio to -25 dB for both 1.31 μm and 1.51 μm wavelength region and the split-length was reduced about 1/5 of other MMI devices. The fabricated device shows successful characteristics for both 1.31 and 1.55 μm wavelengths. These results demonstrate the potential of low-index materials system and the embossing process for photonic integrated circuits.

OCIS Codes : 130.0130, 130.2790, 130.3120.