

Tilted Film-Loaded SAW 도파로를 이용한 2×2 Ti:LiNbO₃ 광 삽입/분기 멀티플렉서

강창민 · 정홍식†

홍익대학교 대학원, 전자전산공학과

☎ 339-800 충남 연기군 조치원읍 신안동

(2003년 7월 30일 받음, 2003년 10월 15일 수정본 받음)

SiO₂ 박막형 음향파 도파로와 Hamming 가중결합 구조를 이용하여 1550nm 파장대역에서 동작하는 음향광학형 2×2 Ti:LiNbO₃ 광 삽입/분기 멀티플렉서를 구현하였다. 제안된 소자는 두 개의 입·출력 광도파로, 두 개의 편광모드분리기와 음향광학형 편광모드 변환기로 구성되었다. 제작된 소자의 삽입손실은 -7 dB로 측정되었으며, ~32 mW RF 구동 파워에서 ~19 dB의 부 모드 레벨이 측정되었다. 삽입/분기 동작 특성을 확인하였으며, 3 dB 통과대역폭과 tuning rate는 ~1.5 nm, 8.1 nm/MHz로 각각 측정되었다.

주제어 : integrated optical add/drop multiplexer, acousto-optic effect, lithium niobate polarization mode converter, polarization mode splitter, surface acoustic wave.

I. 서 론

광 삽입/분기 멀티플렉서(OADM: Optical Add/Drop Multiplexer)는 다 채널 광 전송시스템에서 특정 채널(즉 파장)의 신호들을 선택적으로 삽입(add) 또는 분기(drop) 시키거나, 더 나아가 임의의 경로로 교차 진행시킬 수 있는 광 집적소자이다. OADM은 정보량 증가에 따른 고속 가입자망 확산과 더불어 고밀도 광 연결 망, WDM 망 그리고 대단위 가입자 광선로망의 구성, 제어, 감시 및 관리 등에 있어서 매우 필요한 소자이다. 따라서 OADM은 그 응용 범위와 기술 파급 효과가 크고, 광 가입자망과 초고속 WDM 망에 매우 중요한 부품으로 간주되고 있다. 이러한 소자에 대해서 시스템은 빠른 가변속도, 넓은 파장가변 범위, 작은 삽입손실, 좁은 통과 대역폭, 최소의 파워소모, 편광 무 의존성, 간단한 구동 장치와 더불어 소형의 모듈을 요구한다.^[1-3]

대부분의 OADM 소자들은 파장가변 필터들을 이용하여 개발되었으며, 동작 원리와 성능은 전적으로 파장가변 필터들의 성능과 특성에 좌우된다. 따라서 지금까지 보고된 파장가변 필터들의 특성과 성능을 표 1에 요약하였으며, 이들의 특성들을 상호 비교할 경우 OADM과 관련된 성능을 가늠할 수 있다.^[4,5]

표 1에 나타난 소자들을 비교, 검토할 경우 시스템이 요구하는 OADM 특성을 모두 만족시키는 소자는 없으나, LiNbO₃가 보유하고 있는 AOTF, EOTF, SOTF를 활용하여 개발된 OADM 소자들은 시스템이 요구하는 기준들을 대체적으로 만족시킬 수 있다. 특히 LiNbO₃의 음향광학효과를 이용한 채널 삽입/분기 광 멀티플렉서는 150 nm 이상의 넓은 파장 가변 범위, 1.5 nm 이하의 좁은 통과대역폭, 수 μs 정도의 비교적

빠른 스위칭 속도 그리고 여러 개의 파장 채널을 동시에 삽입/분기할 수 있는 장점들을 가지고 있지만, 한편으로 표면 음향파(SAW: Surface Acoustic Wave) 구동에 필요한 RF 파워와 부 모드(sidelobe)가 비교적 크다는 이유 때문에 실용화에 많은 제약을 받아왔다.^[6,7]

지금까지 LiNbO₃의 음향광학효과를 이용하여 국내외에서 구현된 2×2 OADM은 편광모드 변환기, SAW 도파로, 그리고 편광모드 분리기를 집적화 시켜 제작되어졌다. 그런데 기존의 OADM 제작 공정에서 SAW 도파로는 ~1600Å 두께의 Ti(titanium)을 1050°C 온도에서 24시간 동안 wet-O₂ 분위기에서 확산하여 제작하였다.^[3] 이 경우에 오랜 시간 확산으로 인해서 out-diffusion 현상이 심각해질 수 있으며, 이러한 현상은 광도파로의 특성에 매우 부정적으로 영향을 미치게 된다. 따라서 3~4년 전부터 일본과 유럽 등의 연구진들은 다양한 종류의 유전체 박막들을 이용하여 박막 구조 형태로 SAW 도파로를 구현하기 위한 연구를 진행시켜 왔다. 본 연구에서도 국내에서는 처음으로 SiO₂ 박막 구조로 고안된 SAW 도파로를 이용하여 OADM을 제작하였다.^[8-10]

한편 OADM에서 나타나는 부 모드는 균일 결합 구조의 경우 SAW의 급작스러운 생성, 소멸로 인해 생성된 광 탄성 격자(photoelastic grating)와 광도파로를 따라 진행하는 광자들이 충돌하여 발생하게 된다. 이러한 부 모드를 줄일 수 있는 방법으로 SAW의 세기를 결합 길이에 대하여 서서히 증가, 감소시키는 가중 결합(weighted coupling)이 있으며, 이러한 방법을 'apodization'이라 일컫는다.^[6,7] 본 연구에서는 부 모드를 억제시키기 위해서 광도파로와 박막형 음향파 도파로를 일정한 각도로 기울여 배열시키는 Hamming 가중결합 방식을 도입하였다. 본 논문의 2장에서는 OADM을 구성하고 있는 각 단위 소자들 동작원리와 Hamming 가중결합 방식을 검토하였

†E-mail: hsjung@wow.hongik.ac.kr

표 1. 파장가변 필터들의 기술 및 성능 비교

Type	Tuning Range (nm)	Tuning Speed	Polarization Independent?	Add/Drop?	Tuning Mechanism
FFP	500	1 ms	yes	no	PZT
FBG	10	1 ms	yes	yes	temperature
LC-FP	50	1 μ s	no	no	crystal orientation
Cascaded MZI	5	1 ms	yes	no	temperature
AOTF	250	5 μ s	yes	yes	acousto-optic
EOTF	15	50 ns	yes	yes	electro-optic
SOTF	24	50 ns	yes	yes	strain-optic
Ring Resonator	15	1 ms	no	yes	temperature

FFP: fiber Fabry-Perot, FBG: fiber Bragg grating, LC-FP: Liquid Crystal Fabry-Perot, MZI: Mach-Zehnder Interferometer, AOTF: acousto-optic tunable filter, EOTF: electro-optic tunable filter, SOTF: strain-optic tunable filter

으며, 소자의 설계 및 제작 공정은 3장에서 자세히 언급하였다. 4장에서는 제작된 소자의 모드변환 특성과 관련된 연구 결과를 요약하였으며, 결론을 5장에 실었다.

II. 음향광학형 OADM의 이론적 배경

본 연구에서 제안된 OADM의 구조는 음향광학형 편광모드 변환기(polarization mode converter)와 편광모드 분리기(polarization beam splitter)로 구성된다. 따라서 OADM의 동작과 성능은 이를 구성하고 있는 두 단위 소자의 동작 특성에 전적으로 의존되기 때문에 각 단위 소자의 동작원리를 정성적으로 설명한 다음 OADM의 동작원리를 서술하였다.

① 음향광학형 편광모드변환기

음향광학형 편광모드 변환기의 동작은 SAW에 의해서 LiNbO₃ 표면에 생성된 복굴절 섭동(birefringence perturbation)이 광도파로를 진행하는 두 편광모드(TE, TM)를 결합하여, 변환시키는 원리에 기초한다. LiNbO₃와 같은 복굴절 기판에 제작된 광도파로를 따라 진행하는 두 편광모드는 유효굴절률 값이 같지 않기 때문에 진행하는 위상속도 또한 다르며, 이럴 경우에 두 편광모드간의 결합 효율은 매우 떨어지게 된다. 이러한 구조에서는 일반적으로 두 편광모드의 위상 속도를 서로 정합시켜 주어야만 완전한 모드 변환을 기대할 수 있다. 따라서 음향광학효과를 이용하는 편광모드 변환기 경우에는 SAW의 모멘텀이 편광모드간의 위상속도 부 정합을 보상시킬 때 완전한 편광모드 변환이 일어난다. 한편 편광모드간에 결합이 일어나, 다른 모드로 변환되는데 필요한 최소거리, L_b 는 $\lambda/(n_{TE} - n_{TM}) = \lambda/\Delta n$ 로 정의된다. 여기서 n_{TE} 와 n_{TM} 은 TE, TM 편광모드의 유효굴절률이며, λ 는 광파의 파장이다. 교차지전극(IDT: Inter Digital Transducer)에 의해서 발생되는 SAW의 주기 Λ 가 결합 길이 L_b 와 같을 때 완전한 모드변환이 일어나며, 이때 SAW의 주기 Λ 는 $V_s/f_0 = \lambda/\Delta n$ 로 정의된다. 여기서 V_s 와 f_0 는 SAW의 위상속도와 구동주파수를 각각 의미한다.^[11-13]

② 편광모드 분리기

그림 1과 같이 교차 구조로 설계된 편광모드 분리기의 동작 원리는 두 모드 간섭(TMI: Two Mode Interference) 현상에 의해서 설명될 수 있다. 제안된 구조는 입·출력 단에 위치한

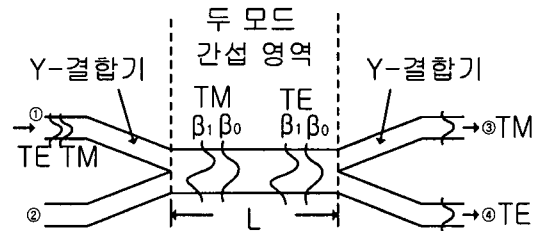


그림 1. 두 모드 간섭 현상을 이용한 편광모드 분리기 구조 및 동작원리.

2개의 단일모드 Y형 커플러와 그 사이에 두 모드 도파로로 구성되어 있다. 기본 모드(fundamental mode)로 입사된 TE, TM 모드는 Y 커플러에 의해서 기본 모드(fundamental mode: β_{0TE}, β_{0TM})와 제1고차 모드(first-order mode: β_{1TE}, β_{1TM})로 각각 진화하여, 총 4개의 모드들이 두 모드 영역에 나타나게 된다. 따라서 4개의 모드가 진행할 수 있도록 두 모드 영역의 도파로 폭과 굴절률 증가량을 적절하게 조절해야 된다. TMI를 이용한 편광모드 분리기의 특징중의 하나는 단일모드 광도파로와 두 모드 도파로 영역간에 그림 1과 같이 파워 손실 없이(adiabatic) 모드 분리와 결합이 일어난다는 것이다. 즉 단일모드 광도파로에 입사된 모드는 똑같은 파워를 갖는 대칭 모드(β_s)와 비대칭 모드(β_a)가 중첩되어 있기 때문에 대칭 모드는 두 모드 영역에서 손실이 거의 없이 기본 모드로 전이되고($\beta_s \rightarrow \beta_0$), 비대칭모드는 제 1모드로 전이되는($\beta_a \rightarrow \beta_1$) adiabatic 분리가 일어난다. 두 모드 영역에 존재하는 모드들이 또한 출력 광도파로와 결합할 때도 가역적으로 adiabatic 결합이 일어난다.^[14]

따라서 두 모드 영역에서 각 편광모드의 기본 모드와 제 1 고차 모드간에는 간섭으로 인한 결합이 그림 1과 같이 형성되면서 z 방향으로 진행하게 된다. 한편 LiNbO₃의 복굴절 및 분산 현상 때문에 일정한 거리를 진행한 후에 두 간섭 모드는 위상 차 때문에 세기 분포가 서로 다르게 나타나게 된다. 두 모드 영역의 진행 거리를 적절하게 조절하여 그림 1과 같이 될 경우 TE, TM 모드는 각각 아래, 위 출력 단으로 통과하게 되며, 궁극적으로 편광모드 분리기로 동작하게 된다. 한편 진행 거리를 조절할 경우 TE, TM 모드의 출력 단을 바꿀 수도 있다.

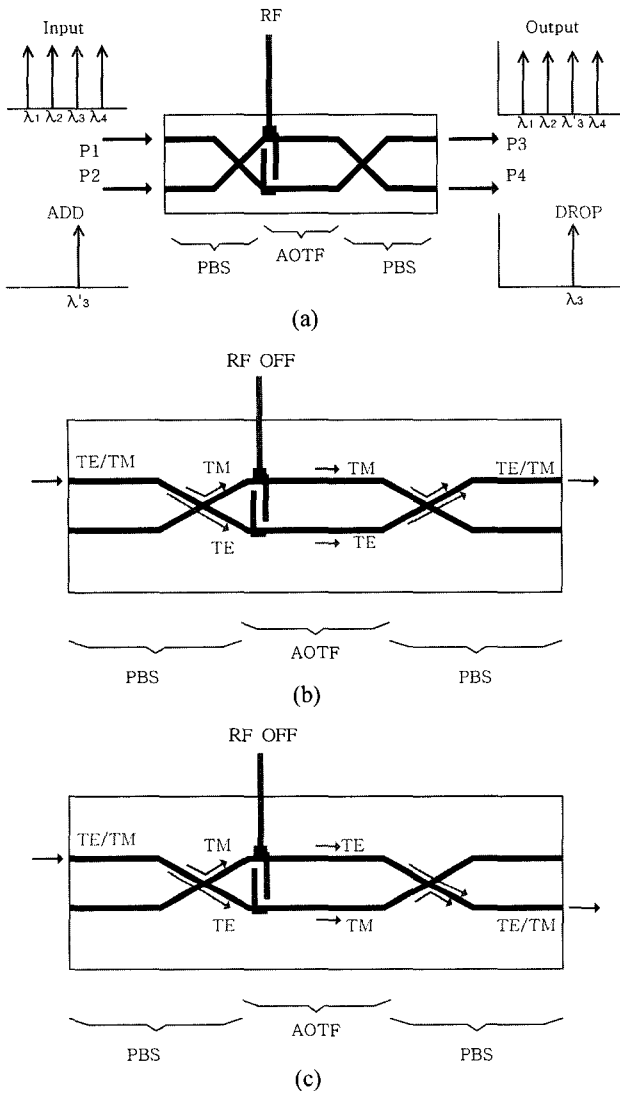


그림 2. 2×2 OADM의 (a) 구조 및 동작원리, (b) RF가 on일 때, (c) RF가 off일 때 편광에 무관하게 동작되는 원리.

③ OADM의 동작원리

음향광학형 OADM은 편광모드 변환기의 파장 선택성에 의해 특정 파장의 광파를 결합(add)시키거나 분리(drop)시킬 수 있다. 그림 2(a)는 두 편광모드 분리기 사이에 음향광학형 편광모드 변환기를 배열시킨 2×2 OADM의 구조이다. 이 구조에서 입·출력 단에 위치한 편광모드 분리기는 OADM이 입사 편광 상태에 관계없이 동작할 수 있게 해준다. 직교 편광 이외의 임의의 편광 상태의 광파는 두 개의 직교 편광 즉 TE, TM 모드로 분리된다. 즉 입력단 P1로 들어오는 입력 광 파 성분 중에서 TE($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$) 모드는 편광모드 분리기를 통해서 아래 편광모드 변환기 쪽으로 교차(⊗)되어 진행하고, TM($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$)는 위쪽 편광모드 변환기 쪽으로 직진(⊙) 상태로 진행하게 된다.

그림 2(a)의 P1 포트에 다수의 파장 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 의 광파가 입력되고 있다. 이 경우 OADM의 전극에 어떤 주파수의 RF도 가하지 않았을 경우 편광모드 변환기가 작동되지 않으

므로 입력된 모든 광파는 P3 포트에 출력된다. 만약 입력 파장 λ_3 의 광파에 맞는 주파수 f_3 의 RF를 전극에 인가하게 되면 편광모드 변환기가 동작하게 되며, 결과적으로 λ_3 의 광파만 P4 포트에 출력되고, 그 외의 광파는 원래의 P3 포트에 출력된다. 또한 특정 파장 λ_3 를 갖는 광파를 추가하고 싶다면, P2 포트에 파장 λ_3 의 광파를 입력시키고, 그에 맞는 주파수 f_3 의 RF를 인가해 주면 된다.

다음의 그림 2(b), (c)는 OADM이 입사된 광파의 편광 모드에 무관하게 동작한다는 것을 도식적으로 보여주고 있다. 그림 2(b)는 임의의 편광 모드를 가지는 광파가 입사된 경우, 입사된 광파에 맞는 RF를 인가하지 않았을 때의 OADM 동작을 나타내고 있다. 그림 2(b)를 보면 알 수 있듯이 P1 포트에 입사된 임의의 편광을 가지는 광파는 편광 모드에 상관없이 P3 포트에 출력되는 것을 볼 수 있다. 그림 2(c)의 경우는 입사된 광파에 맞는 RF를 인가했을 때 OADM의 동작을 나타내며, 이 경우에는 편광 모드에 상관없이 P4 포트에 광파가 분리되는 것을 알 수 있다.^[7]

III. 설계 및 제작공정

그림 3은 SiO₂ 박막형 SAW 도파로를 이용하여 설계된 OADM 구조이다. 1.55 μm 파장대역에서 Ti:LiNbO₃ 광도파로가 단일모드로 동작시키기 위해서 도파로의 폭이 8 μm 가 되도록 설계하였다. SiO₂ 박막 구조를 이용한 경우에는 박막이 증착된 영역의 SAW 속도(3685 m/s)가 그렇지 않은 부분의 속도(3700 m/s)와 비교해서 감소되어, SAW 도파로의 기능을 수행하게 된다.^[8,9] 한편 기존의 Ti 확산 공정으로 SAW 도파로를 제작할 경우, Ti이 확산된 cladding 부분에서 SAW의 속도는 Ti 확산되지 않은 core 영역의 속도와 비교해서 약 ~0.3% 정도 증가되어, 궁극적으로는 SAW가 core 영역 안에 구속된다.^[12,13]

편광모드 분리기는 참고문헌 [14]에 제시된 규격으로 설계하였으며, 전체적인 도파로 구조를 BPM-CAD를 이용하여 성능을 검증하였다. P1으로 입사된 광파는 편광상태에 관계없이 항상 P3로 출력되며, BPM-CAD로 동작 성능을 확인하였다. 부 모드 레벨을 줄이기 위해서 그림 3(b)와 같이 음향파 도파로를 0.6° 정도 기울여(tilting), 광파와 SAW 간에 Hamming 가중결합 방식을 도입하였다. 한편 가중결합 방식으로 얻은 부 모드 개선 효과를 비교하기 위해서 가중결합을 고려하지 않은 그림 3(a)와 같은 구조를 제작하였다.

제작 공정은 광 도파로 제작, IDT(Inter-Digital Transducer) 전극 제작 그리고 SAW 도파로 제작과 같이 3단계로 진행되었다. 제작 공정을 단계별로 보면 ~1000Å Ti을 x-cut LiNbO₃ 기판 위에 증착한 다음, 사진 식각 공정으로 형성된 8 μm 폭의 Ti 패턴을 1050°C, wet-O₂ 분위기에서 8시간 동안 확산시켜 1550 nm 파장대역에서 단일모드 특성을 나타내는 그림 3과 같은 2×2 광 도파로 구조를 형성하였다. 이어서 입사 및 출력 단면을 optical-grade 수준으로 연마한 뒤, 주기 개수 N=20, 개구면 간격 110 μm , 그리고 $\Lambda=21.2 \mu\text{m}$ 주기를 갖는 IDT를 ~3000Å Al(aluminum)으로 제작하였다. 이어서 E-beam 증착기를 이용하여 ~3800Å의 SiO₂ 박막을 300°C

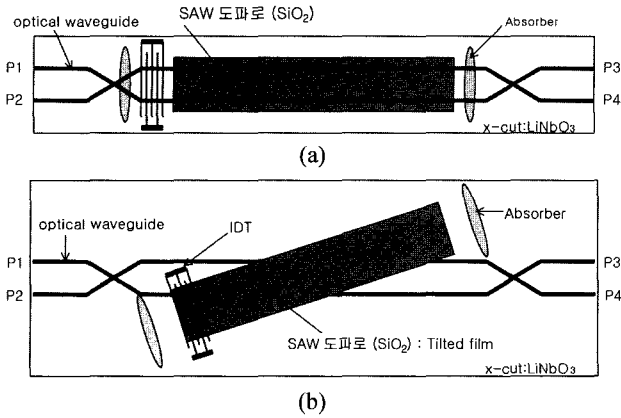


그림 3. SiO₂ 박막형 SAW 도파로를 이용한 OADM의 schematic diagrams: (a) 가중결합을 적용시키지 않은 구조 (b) Hamming 가중결합을 적용시킨 구조.

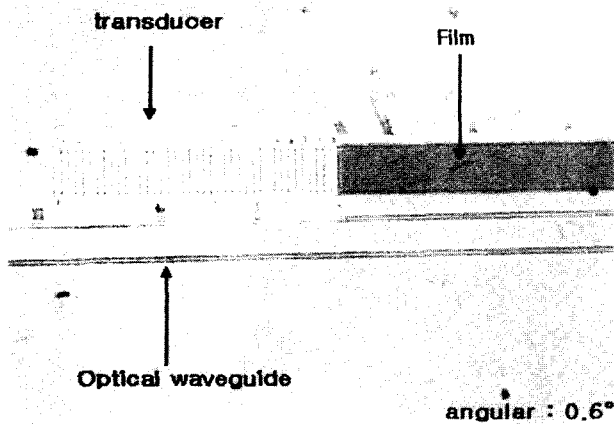


그림 4. 제작된 OADM(그림 3(b))의 현미경 확대 사진.

온도에서 형성하였다. 그림 3(b)의 경우에는 가중결합을 적용하기 위해서 80 μm 폭으로 0.6° 기울어진 형태로 SAW 도파로를 구현하였다. 그림 4는 최종 제작된 OADM은 현미경 확대 사진이다. 소자 전체 길이는 50 mm이며, 두 absorber로 정의된 편광모드 변환기의 구간은 20 mm이다.

IV. 삽입/분기 특성

제작된 OADM의 특성을 측정하기 위해서 Butt 결합시스템을 구성하였다. 광원은 ~1550 nm의 파장 대역을 갖는 DFB 레이저와 broad-band source를 사용하였다. 실시간 측정을 위해서 DAQ 카드와 LabView 프로그램을 활용하였다. 소자를 측정하기 전에 IDT에 의해서 구동된 SAW가 입·출력면에서 반사되는 것을 막고, 흡수시키기 위해서 입·출력단 전후에 scotch tape를 이용하여 absorber를 형성하였다.

그림 5는 1555.16 nm 파장의 DFB 광원을 그림 3(a)의 OADM P1에 입사시킨 상태에서, 169~171 MHz 범위의 RF 신호를 인가하였을 때 P3, P4로 출력되는 광 파워를 Lab-View를 이용하여 측정한 것이다. RF 주파수 170.3 MHz에서 P4로 광 파워가 분기되었으며, 이 경우에 145 mW RF 파워,

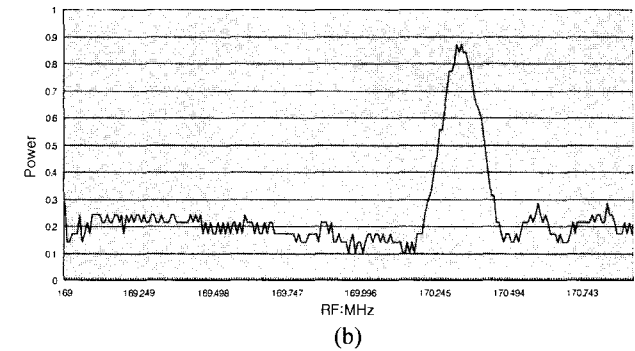
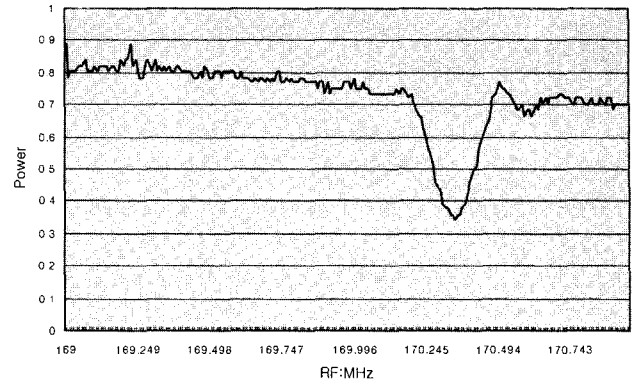


그림 5. 1555.16 nm 입사 광파에 대해서 170.3 MHz SAW에 의해서 (a) P₁→P₃, (b) P₁→P₄로 분기되는 동작특성(그림 3(a)).

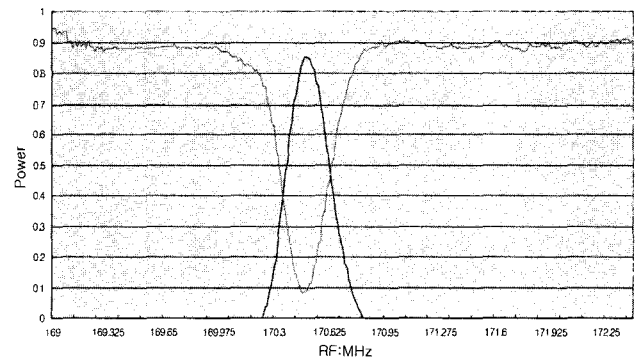


그림 6. 1554.9 nm 입사 광파에 대해서 171.5 MHz SAW에 의해서 P₁→P₄로 분기되는 동작특성 (그림 3(b)).

5 dB의 부 모드 레벨 그리고 약 ~2.5 nm 정도의 3dB 통과대역폭이 측정되었다. 예상보다 비교적 높은 RF 파워가 소모되었으며, 가중결합이 적용되지 않았기 때문에 예측한대로 비교적 큰 부 모드 레벨이 측정되었다.

그림 6은 1554.9 nm 파장의 DFB 광원을 그림 3(b)의 가중결합형 OADM(그림 3(b)) P1에 입사시킨 상태에서, 169~172 MHz 범위의 RF 신호를 인가하였을 때 P3, P4 두 출력단으로 진행되는 광 파워를 Lab-View를 이용하여 측정한 것이다. 주어진 조건에서 171.5 MHz의 RF 주파수에서 P4로 광 파워가 분기되는 것을 확인할 수 있었다. 이 경우에 인가된 RF 파워는 32 mW로 측정되었으며, 16 dB 이상의 부 모드 (sidelobe) 레벨 그리고 약 ~1.5 nm의 3 dB 통과대역폭이 측

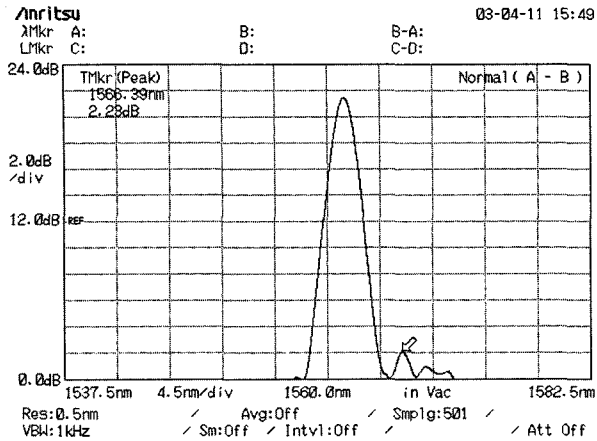


그림 7. 171.5 MHz, 32 mW RF에 대해서 broad-band source로부터 입사된 광파의 분기특성(그림 3(b)).

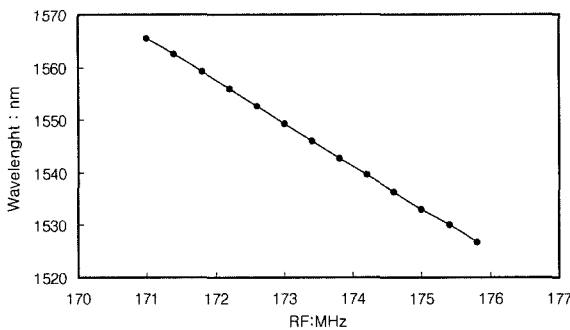


그림 8. RF 주파수 변화에 따라 분기되는 광 파워가 최대가 되는 파장변화.

정되었다. 따라서 가중결합 방식이 적용되지 않은 OADM과 비교해서 부 모드 레벨은 10 dB 이상 감소되었으며, SAW 구동에 필요한 RF 파워도 100 mW 이상 줄일 수 있었다.

그림 7은 1550 nm 파장대역의 broad-band source 광파를 가중결합형 OADM(그림 3(b)) P1에 입사시켜서 분기 특성을 측정 한 것이다. 인가된 RF 주파수와 파워는 171.5 MHz, 32 mW 이며, 이 조건에서 1561.44 nm 파장 성분이 분기되었다. 19 dB 이상의 부 모드 레벨과 ~1.5 nm 통과 대역폭이 측정되었다.

그림 8은 RF 주파수 변화에 따라 분기되는 파워가 최대가 되는 파장의 변화를 측정한 결과로 기울기에 해당되는 tuning rate는 8.1(nm/MHz)로 측정되었다. 이 측정에서 인가된 RF 파워는 32 mW이다.

V. 결 론

Ti:LiNbO₃ 음향광학형 편광모드 변환기, 편광모드 분리기와 SiO₂ 박막형 SAW 도파로를 이용하여 1550 nm 파장영역에서 편광에 관계없이 동작하는 파장가변형 삽입/분기 광 멀티플렉서를 제작하였다. 부모드 레벨을 줄이기 위해서 SAW 도파로를 0.6° 정도 기울여, 광파와 SAW 간에 Hamming 가중결합 방식을 적용하였으며, 19 dB 이상의 부 모드 레벨이 측정되었다. 이 구조는 가중결합을 도입하지 않은 OADM과 비교해서 14

dB 이상 부 모드 레벨을 줄인 것이다. 소자를 동작시키는데 인가된 RF 파워는 32 mW, 그리고 3 dB 통과대역폭은 ~1.5 nm 측정되었으며, RF 주파수 변화에 따라 분기되는 파워가 최대가 되는 파장 변화율(즉 tuning rate)은 8.1(nm/MHz)로 측정되었다.

한편 RF 파워가 비교적 높게 측정된 것은 박막형 SAW 도파로 제원(즉 두께, 폭, 간격 등)이 최적화 되지 않았기 때문이며, 또한 SiO₂ 박막의 증착 장비와 공정조건에 따라 SAW 도파로의 성능이 민감하게 영향받는 것으로 보고되고 있다. SiO₂ 박막이외에 In₂O₃-SiO₂, Au/Al₂O₃, Au/SiO₂와 같은 박막들을 이용하여 SAW 도파로를 구현하려는 연구도 수행되고 있다. 따라서 추가적인 보완 연구를 수행할 경우 Ti 확산형 SAW 도파로 보다 공정이 간단하면서도, 성능이 좋은 박막형 SAW 도파로를 구현할 수 있으리라 예상되며, 이를 본 논문에서 제시한 구조에 적용할 경우 저 전력이면서 성능이 훨씬 개선된 OADM을 제작할 수 있으리라 예견된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-30200-010-3) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] G. K. Chang, G. Ellinas, J. Gamelin, M. Z. Iqbal, and Charles A. Brackett, "Multi-wavelength Reconfigurable wdm/atm/sonnet network Testbed," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 1320-1340, 1996.
- [2] T. Mizuochi, T. Kitayama, K. Shimizu, and K. Ito, "Interferometric Crosstalk-Free Optical Add/Drop Multiplexer Using Mach-Zehnder-Based Fiber Grating," *J. Lightwave Technol.*, vol. 6, pp. 265-276, 1996.
- [3] T. Chikama, H. Onaka, and S. Kuroyanagi, "Photonic networking using optical add drop multiplexers and optical cross-connects," *FUJITSU Sci. Tech. J.*, 35, pp. 46-55, 1999.
- [4] J. M. H. Elmighani and H. T. Moutfah, "Technologies and architectures for scalable dynamic dense WDM networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 38, pp. 56-58, 2000.
- [5] D. Sadot and E. Boimovich, "Tunable optical filters for dense WDM networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 36, pp. 1059-1062, 1998.
- [6] K.-W. Cheung, "Acoustooptic tunable filters in narrowband WDM networks: system issues and network applications," *IEEE J. Selected Areas in Communications*, vol. 8, no. 6, pp. 1015-1025, Aug. 1990.
- [7] G.-J. Jung, J.-H. Kim, and H.-S. Jung, "Ti:LiNbO₃ 2×2 optical add/drop multiplexers utilizing acousto-optic effect," *J. Optical Society of Korea*, vol. 6, no. 2, pp. 27-32, June 2002.
- [8] Heyshan Mendis, et al., "Apodized integrated acousto-optical polarization converters using tilted film-loaded SiO₂ acoustical waveguides on LiNbO₃," *Proceeding of 10th European Conference on Integrated Optics*, pp. 35-38, Apr.

2001.

[9] O. A. Peverini, H. Herrmann, and R. Orta, "Film-loaded strip- and slot-type SAW waveguides for integrated acousto-optical polarization converters in LiNbO₃," *Proceeding of 10th European Conference on Integrated Optics*, pp. 31-34, Apr. 2001.

[10] T. Nakazawa, S. Taniguchi, and M. Seino, Ti:LiNbO₃ acousto-optic tunable filter (AOTF), *FUJITSU Sci. Tech. J.*, vol. 35, pp. 107-112, 1999.

[11] H. Herrmann, U. Rust, and K. Schafer, "Tapered acoustical directional couplers for integrated acousto-optic mode converters with weighted coupling," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 2, pp. 364-374, 1995.

[12] 임경훈, 정홍식, "방향성 결합구조의 음향파 도파로를 이용한 음향광학형 파장가변 광 필터의 부모드 억제에 관한 연구," 한국광학회지, 제 11권, 제6호, pp. 423-428, 2000년 12월.

[13] 정기조, 김정희, 정홍식, "Tapered 방향성 가중 결합 음향파 도파로 구조를 이용한 음향광학형 파장가변 광 필터에 관한 연구," 전자공학회논문지, 제 39 권, SD편 제 1호, pp. 58-66, 2002년 1월.

[14] 김정희, 정기조, 정홍식, 이한영, "1.55 μm Ti:LiNbO₃ 광도파로의 두모드 간섭을 이용한 편광모드 분리기," 한국광학회지, 제 13권, 제1호, pp. 32-37, 2002년 2월.

2×2 Ti:LiNbO₃ optical add/drop multiplexers utilizing tilted film-loaded SAW waveguides

Chang-Min Kang and Hong-Sik Jung[†]

Department of Electronics and Computer Engineering, Hong-ik University, Jochiwon 339-800, KOREA

[†]E-mail: hsjung@wow.hongik.ac.kr

(Received July 30, 2003, Revised manuscript October 15, 2003)

Optimum Hamming apodized acousto-optic 2×2 add/drop multiplexers, using SiO₂ film loaded acoustic waveguide with angular offset to the Ti:LiNbO₃ waveguide, were fabricated. The four-port device consists of two input waveguides, a polarization beam splitter (PBS), two polarization conversion/acoustooptic tuning waveguide sections, a second PBS and two output waveguides. Insertion loss <7.1 dB has been obtained and side-lobe of ~19 dB for ~32 mW RF driving power has been realized. Add/drop performance has been confirmed and a linear tuning rate of 8.1 nm/MHz and a 3 dB spectral width of ~1.5 nm were demonstrated.

OCIS Codes : 130.0130, 130.2790, 130.3060, 130.3120, 130.3730.