

스트레인광학효과를 이용한 2×2 Ti:LiNbO₃ 삽입/분기 집적광학 멀티플렉서

정홍식[†] · 최용욱

홍익대학교, 과학기술대학, 전자전기공학과
Ⓣ 339-800 충남 연기군 조치원읍 신안동 300

(2006년 8월 17일 받음, 2006년 10월 11일 수정본 받음)

1550nm 파장대역에서 편광에 관계없이 동작하는 Ti:LiNbO₃ 2×2 삽입/분기 광 멀티플렉서를 구현하였다. 소자는 두 개의 입출력 광도파로, 두 개의 편광모드분리기, 두 개의 편광모드 변환기 그리고 전기광학효과로 파장을 가변시킬 수 있는 전극으로 구성되었다. TE, TM 편광에 대해서 단일모드 특성을 갖는 채널 광도파로는 x-cut LiNbO₃에 Ti 확산 방법으로 제작하였으며, 채널 광도파로위에 배열된 SiO₂ 패드의 전단 스트레인을 이용하여 위상정합 편광모드변환기를 구현하였다. 한편 전기광학효과를 이용하여 파장을 가변시키기 위해서 전압을 인가하여 광도파로의 복 굴절률을 변화시켰다. 0.094nm/V 파장가변률과 최대 17nm 파장을 가변시켰으며, 8.2dB 부 모드레벨과 3.72nm FWHM을 측정하였다.

주제어 : Integrated optical add/drop multiplexer, Strain-optic effect, Quasi phase matching, Ti:LiNbO₃ Channel waveguide, Polarization mode converter, Electro-optic effect, Polarization mode splitter.

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]

리튬나오베이트를 이용한 OADM에 관한 국내외의 대부분 연구는 전기광학효과와 음향광학효과를 이용하여 진행되어 왔으며, 본 연구그룹도 음향광학효과를 이용하여 성공적으로 구현된 OADM을 발표한 적이 있다.^[6,7] 음향광학효과를 이용한 OADM은 150nm 이상의 넓은 파장 가변 범위, 수 μ s 정도의 비교적 빠른 스위칭 속도 그리고 여러 개의 파장 채널

을 동시에 삽입/분기할 수 있는 장점들을 가지고 있지만, 한편으로 표면 음향파(surface acoustic wave) 구동에 필요한 RF 파워와 부 모드(sidelobe)가 비교적 크고, 1.5nm 정도의 통과대역폭이 WDM 통신에 적용하기에는 넓기 때문에 실용화에 많은 제약을 받아왔다. 전기광학효과를 이용한 OADM은 편광모드변환과 파장가변에 필요한 2개 이상의 파워소스를 필요로 하기 때문에 파워 소모도 크고, 시스템과 연동하기에도 적절하지 못한 것으로 평가되어져 왔다.^[8,9] 한편 리튬나오베이트의 스트레인광학효과를 이용할 경우 파워 소모가 필요하지 않는 편광모드변환기를 구현하여 집적화 할 수 있으며, 이에 따라 전체적으로 소자의 길이를 축소할 수 있으며, 비교적 좁은 통과 대역폭과 작은 부 모드를 기대할 수 있다.^[10]

본 연구는 국내에서 처음으로 리튬나오베이트의 스트레인 광학효과를 활용하여 OADM 구현을 시도한 것이며, 미국 Texas A&M 대학의 Henry F. Taylor 교수 그룹이 제안한 삽입/분기 멀티플렉서 구조를 참조하여 본 연구를 수행하였다.^[11-13] 본 논문의 구성은 다음과 같다. 스트레인광학효과를 이용하는 OADM의 구조와 동작원리를 2장에서 설명하였고, OADM를 구성하고 있는 단위소자들 즉 편광모드분리기와 편광모드변환기의 구조와 동작원리를 3장에서 요약하였다. 4장에서는 OADM의 제작공정과 측정 결과들을 자세하게 언급하였고, 마지막으로 5장에서 결론 및 논의로 마무리하였다.

II. 스트레인광학 삽입/분기 멀티플렉서의 구조 및 동작원리

그림 1은 두개의 편광모드분리기(polarization mode splitter)와 그 사이에 위치한 두 개의 편광모드 변환기(polariz-

[†] E-mail: hsjung@wow.hongik.ac.kr

표 1. 파장가변 필터들의 기술 및 성능 비교.

Type	Tuning Range (nm)	Tuning Speed	Bandwidth (3dB)	Channel-spacing/isolation	Polarization Independent?	Add/Drop?	Tuning Mechanism
FFP	500	1 ms	<0.5nm	2nm/30dB	yes	no	PZT
FBG	10	1 ms	<0.2nm	1.6nm/22dB	yes	yes	temperature
LC-FP	50	1μs	<0.5nm	2nm/30dB	no	no	crystal orientation
Cascaded MZI	5	1 ms	<0.2nm	0.4nm/22dB	yes	no	temperature
AOTF	250	5μs	~1.5nm	4nm/30dB	yes	yes	acousto-optic
EOTF	15	50ns	~1.5nm	4nm/25dB	yes	yes	electro-optic
SOTF	24	50ns	~1.5nm	4nm/25dB	yes	yes	strain-optic
Ring Resonator	15	1 ms	~0.2nm	2nm/30dB	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

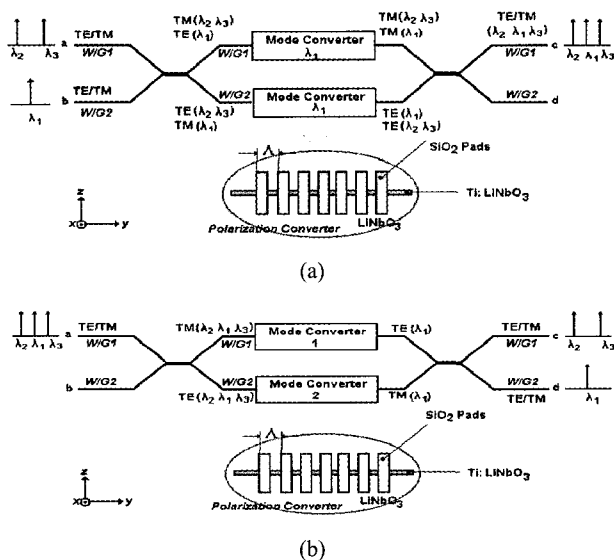


그림 1. 2×2 삽입/분기 스트레인광학 OADM의 구조 및 동작원리: (a) 삽입, (b) 분기.

ation mode converter)로 구성되어 있는 스트레인광학 삽입/분기 멀티플렉서의 구조를 개념적으로 나타낸 것이다. 그림 1(a)는 2×2 광 삽입/분기 멀티플렉서의 채널 삽입을 개념적으로 나타낸 것이다. 입력포트 a로 부터 입사되는 임의의 편광 상태로 구성되어 있는 λ_2, λ_3 채널에 입력포트 b를 통해서 임의의 편광 상태인 λ_1 채널을 삽입하는 것이다. 여기서 “임의의 편광 상태”는 광섬유를 통하여 전송되는 광파의 편광이 랜덤(random)하게 분포되어 있음을 의미한다. 직교 편광 이외의 임의의 편광 상태는 두 개의 직교 편광 즉 TE, TM 모드로 분리된다. 이러한 경우를 그림 상에서는 TE/TM으로 표시하였다. 입력포트 a로 입사되는 임의의 채널 성분 중에서 $TE(\lambda_2, \lambda_3)$ 모드는 편광모드분리기를 통해서 편광모

드변환기 2쪽으로 교차(⊗)되어 진행되고, $TM(\lambda_2, \lambda_3)$ 는 편광모드변환기 1쪽으로 직진(⊖) 상태로 진행된다. 한편 입력 포트 b를 통해서 입사되는 채널의 $TE(\lambda_1)$ 성분은 편광모드변환기 1로 교차(⊗)되어 진행되고, $TM(\lambda_1)$ 은 편광모드변환기 2로 진행된다. 한편 각 편광모드변환기는 특정 파장 λ_i 에서만 모드변환이 일어난다고 가정할 경우, 편광모드변환기 1의 $TE(\lambda_1)$ 은 $TM(\lambda_1)$ 으로 변환되고, 편광모드변환기 2에서는 $TM(\lambda_1)$ 이 $TE(\lambda_1)$ 으로 변환된다. 한편 각 변환기의 λ_2, λ_3 성분은 편광상태에 아무런 영향을 받지 않고 통과하게 된다. 출력포트에 위치한 편광모드분리기에서는 TE 모드는 다시 교차되어 진행되고, TM 모드는 직진 상태로 출력하게 되어, 출력포트 c에서는 $TE(\lambda_2, \lambda_3), TM(\lambda_2, \lambda_3), TE(\lambda_1), TM(\lambda_1)$ 모든 성분이 나오게 된다. 따라서 궁극적으로 출력포트 c에서 나오는 신호에는 편광 상태에 관계없이 λ_1 채널이 삽입되어 출력하게 된다. 만약 입력포트 b에서 λ_1 이외의 채널들은 출력포트 d로 나오기 때문에 선택적으로 채널을 출력포트 c로 나오는 채널에 삽입(add)시킬 수가 있다.

한편 그림 1(b)는 입력포트 a로 들어오는 채널 중에서 임의의 특정 채널을 출력포트 d로 분기시키는 개념을 도식적으로 나타낸 것이다. 입력포트 a에 임의의 편광 상태로 입사된 광파($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$)는 입력포트에 위치한 편광모드 분리기에서 TE, TM 모드로 분리되어, 파장 성분에 관계없이 $TM((\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 모드 성분은 편광모드변환기 1로 직진(⊖)되며, $TE(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ 모드 성분은 편광모드변환기 2로 교차(⊗)되어 진행된다. 편광모드변환기 1은 $TE \leftrightarrow TM$ 모드 간에 위상속도가 정합된 파장성분 λ_1 에서 $TM(\lambda_1)$ 모드를 $TE(\lambda_1)$ 모드로 변환시키며, 편광모드변환기 2는 $TE(\lambda_1)$ 모드를 $TM(\lambda_1)$ 모드로 변환시키게 된다. 한편 λ_2, λ_3 의 TM, TE 모드 성분은 모드변환 없이 그대로 각 편광모드변환기를 통과하게 된다. 출력 포트에 위치한 편광모드분리기에서 편광모드변환기 1의 $TE(\lambda_1)$ 모드는 출력포트 d로 교차(⊗)되어 진행하게 되고, 모드변환기 2의 $TM(\lambda_1)$ 모드는 출력포트 d로 직진(⊖)하여, 궁극

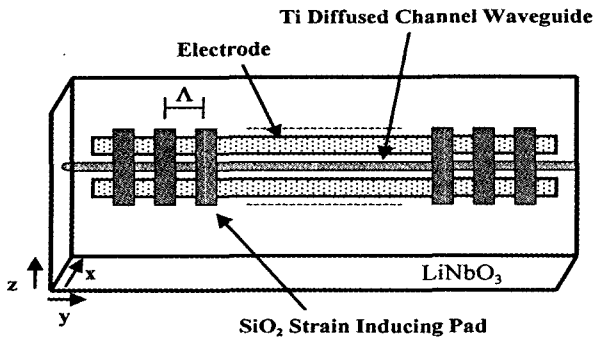


그림 2. 파장가변 스트레인광학 편광모드 변환기의 개략도.

적으로 출력포트 d에서는 TE/TM 모드(λ_1)가 동시에 출력되어 입사 광파와 동일한 편광상태의 채널 λ_1 이 나오게 된다. 따라서 입력포트의 편광상태에 관계없이 출력포트 d에서는 입력포트와 같은 편광을 유지하게 된다. 한편 출력포트 c에서는 λ_2, λ_3 입사 광파가 나오게 된다. 편광모드변환기에서 모드 변환이 일어나는 특정 파장 채널을 변경시킬 경우, 본 소자는 임의의 채널을 분기(drop)시킬 수 있게 된다.

III. 편광모드 분리기와 변환기

본 연구에서 제안된 2x2 삽입/분기 스트레인광학 OADM의 구조는 스트레인광학 편광모드변환기와 편광모드분리기로 구성된다. 따라서 OADM의 동작과 성능은 이를 구성하고 있는 두 단위 소자의 동작 특성에 전적으로 좌우되기 때문에 각 단위 소자의 동작원리에 대해서 정성적으로 서술하였다.

3.1. 스트레인광학 편광모드변환기

Ti:LiNbO₃ 채널 광도파로 위에 그림 2와 같은 구조로 SiO₂ 주기형 패드를 증착하고, 이로부터 생성된 스트레인을 이용할 경우 특정 파장대역에서 동작하는 파장가변 편광모드변환기를 구현할 수 있다. 제작공정 중에서 증착공정 과정에서 발생하는 플라즈마 온도에 의해서 SiO₂와 LiNbO₃ 사이에 열팽창 부정합이 발생되고, 이로 인하여 스트레인이 접합면에 발생된다. 특히 그림 2와 같은 구조에서는 편광모드 결합을 일으키는 전단스트레인(shear strain) S_6 ($6 \rightarrow xy$)가 발생되며, 이것은 비대각선(off-diagonal) 굴절률 성분 n_5 ($5 \rightarrow xz$)를 아래와 같은 관계식에 의해서 구동시키게 된다.^[14]

$$\Delta n_5 = -\left(\frac{n^3}{2}\right)P_{41}S_6 \quad (1)$$

여기서 $n=(n_e n_o)^{1/2}$, n_e, n_o 는 이상파와 정상파의 유효굴절률을 의미하며, P_{41} 는 스트레인광학계수이다. 한편 결합모드 이론으로부터 유도된 편광모드변환기의 편광모드 변화율은 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.^[14]

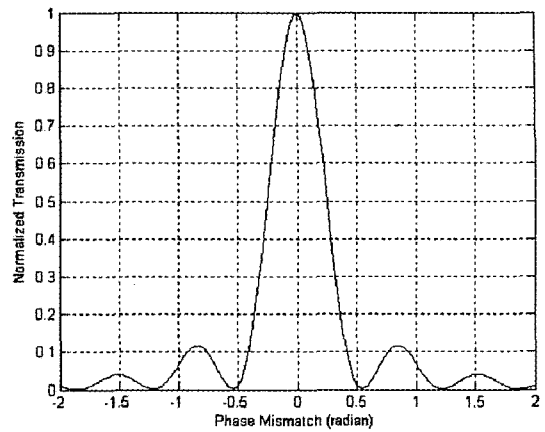


그림 3. 위상부정합에 따른 편광모드 변화율에 대한 전산모사.

$$T(\lambda) = \frac{\kappa^2}{\left(\kappa^2 + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2\right)} \sin^2 \left[\sqrt{\kappa^2 + \left(\frac{\Delta\beta}{2}\right)^2} L \right] \quad (2)$$

여기서 $\Delta\beta = (\beta_{TE} - \beta_{TM}) = (2\pi/\lambda_0)\Delta n$, κ 는 두 편광모드 간에 결합계수, 그리고 L 은 결합길이를 의미한다. 식 (2)에 근거한 편광모드 변화율이 그림 3과 같이 전산모사 되었으며, 두 모드 간에 위상 속도가 정합되었을 때 완벽한 모드 변환이 일어나게 된다. 한편 채널 광도파로를 따라 배열된 전극에 전압을 인가시켜 전기광학효과에 의해서 복굴절 Δn 을 변화시켜서 모드변환 효율이 최대가 되는 파장을 가변시킬 수 있게 된다. 전압에 따른 파장변화율(wavelength tuning rate)은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{d\lambda_0}{dV_T} = \frac{1}{2} \left(\Gamma_{TE} n_3^3 \gamma_{33} - \Gamma_{TM} n_1^3 \gamma_{13} \right) \frac{\Lambda}{g} \quad (3)$$

여기서 Γ_{TE}, Γ_{TM} 은 광파와 전계 간의 중첩(overlap) 정도를 나타내며, γ_{33} 와 γ_{13} 는 전기광학계수이며, 그리고 g 는 전극간격이다.

그림 1과 같은 멀티플렉서를 제작하기 전에 단위 연구로 가시광선 파장대역에서 동작하는 그림 2와 같은 편광모드변환기를 제작하였다. X-cut LiNbO₃에 4 μ m 폭과 300 Å 두께의 Ti 채널 패턴을 950°C 온도에서 7시간 동안 습식산소(wet-oxygen) 분위기로 확산시켜 채널 광도파로를 제작하였다. 이어서 파장가변에 필요한 전압을 인가시키기 위해서 2200 Å NiCr과 lift-off 공정을 이용하여 길이 8mm, 간격 15 μ m의 전극을 형성하였다. 고주파 마그네트론 플라즈마 스퍼터(sputter)를 이용하여 1.2 μ m 두께 SiO₂를 증착한 다음, RIE 공정을 이용하여 7.6 μ m, 8 μ m 주기를 갖는 직사각형(4x2000 μ m) 패드를 형성하였다. 복굴절 재료인 LiNbO₃에서 TE, TM 두 편광모드가 효과적으로 모드결합이 일어나기 위해서는 위상정합 조건을 충족해야 되는데 그림 2와 같은 구조에서는 Bragg

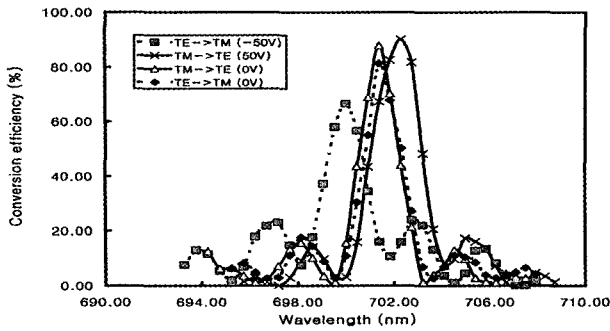


그림 4. 인가전압과 파장변화에 따른 모드 변환효율.

의사위상정합(QPM: quasi phase matching) 방법을 활용하여 SiO₂ 패드를 Λ 주기로 배열하여 위상정합을 구현하였으며, 주기(Λ)는 다음과 같이 정의된다.

$$\Lambda = \frac{\lambda}{\Delta n} = \frac{\lambda}{|n_e - n_o|} \quad (4)$$

제작된 소자의 동작특성을 tunable dye laser를 이용하여 측정하였다. TE, TM 각 입사편광모드에 대해서, 가변전압 조건에 따라 그림 3과 같은 TE↔TM 모드변환효율(mode conversion efficiency)을 측정하였다. $V_T=0$, $\Lambda=8\mu\text{m}$ 조건에서, 입사 편광모드 TE, TM에 대한 최대 모드변환 효율은 701.39 nm 파장에서 82%, 86%로 측정되었으며, 이 경우에 복굴절률은 $\Delta n \approx 0.087$ 로 계산되었다. 파장대역폭 FWHM은 1.45nm로 측정되었으며, 이론적 계산치 1.4nm와 매우 잘 일치되었다. $V_T = -50\text{V}$ 를 인가하였을 경우, 변환효율이 최대가 되는 파장이 TE 입사모드에 대해서 701.39nm에서 700nm로 이동하였으며, TM 입사모드 경우에는, $V_T = +50\text{V}$ 를 인가시킨 조건에서 702.3nm로 파장이 이동되었다. 이 측정을 통해서 인가전압에 따른 파장 변화율은 0.029nm/V로 측정되었으며, 계산치 0.028nm/V와 매우 잘 일치되었다.

3.2. 편광모드 분리기

그림 5와 같이 교차구조로 설계된 편광모드 분리기의 동작 원리는 두 모드 간섭(TMI: two mode interference) 현상에 의해서 설명될 수 있다. 제안된 구조는 입·출력 단에 위치한 2개의 단일모드 Y형 커플러와 그 사이에 두 모드 광도파로로 구성되어 있다. 기본 모드(fundamental mode)로 입사된 TE, TM 모드는 Y 커플러에 의해서 기본 모드(β_{0TE}, β_{0TM})와 제 1 고차 모드(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 특징 중의 하나는 단일모드 광도파로와 두 모드 도파로 영역 간에 그림 5와 같이 파워 손실 없이(adiabatic) 모드 분리와 결합이 일어난다는 것이다. 즉 단일모드 광도파로에 입

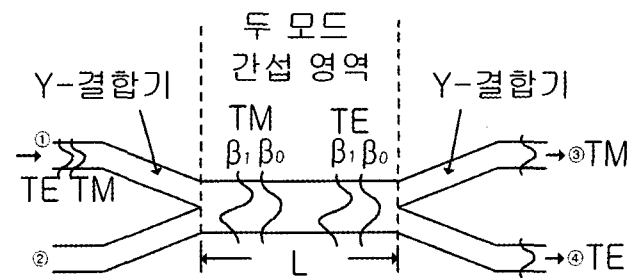


그림 5. 두 모드 간섭 현상을 이용한 편광모드 분리기 구조 및 동작원리.

사된 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 ($\beta_s \rightarrow \beta_0$), 비대칭 모드는 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.^[15]

따라서 두 모드 영역에서 각 편광모드의 기본 모드와 제 1 고차 모드 간에는 간섭으로 인한 결합이 그림 5와 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 5와 같이 될 경우 TE, TM 모드는 각각 아래, 위 출력 단으로 통과하게 되며, 궁극적으로 편광모드분리기로 동작하게 된다. 한편 진행 거리를 조절할 경우 TE, TM 모드의 출력포트를 바꿀 수도 있다.

IV. 제작공정 및 측정

X-cut LiNbO₃를 이용해서 y 축 방향으로 진행하는 OADM 소자를 그림 6과 같은 구조로 제작하였다. 의사위상정합을 구현하기 위해서 식 (4)를 근거로 해서 SiO₂ 박막 주기를 21.0 μm 로 설계하였으며, 400개의 박막패드를 배열하였다. 파장을 가변시키기 위해서 배열된 전극 간격 및 편광모드 분리기의 결합길이는 각각 12 μm , 520 μm 로 하였으며, 전극 길이는 10mm로 설계하였다.

제작 공정은 광도파로 제작, 전극 제작 그리고 SiO₂ 패드 제작과 같이 3 단계로 진행되었다. 제작 공정을 단계별로 보면 ~1000 Å 두께의 Ti을 x-cut LiNbO₃ 기판 위에 전자빔(e-beam) 증착기를 이용해서 증착한 다음, 사진식각 공정으로 형성된 8 μm 폭의 Ti 패턴을 1050°C, 습식산소 분위기에서 8시간 동안 확산시켜 1550nm 파장대역에서 단일모드 특성을 나타내는 그림 6의 2×2 광 도파로 구조를 형성하였다. 이어서 입사 및 출력포트 단면을 optical-grade 수준으로 연마한 뒤, 열(thermal) 진공 증착장비를 이용해서 ~3000 Å Al(aluminum)을 증착해서 사진식각공정을 거쳐 전극을 형성하였

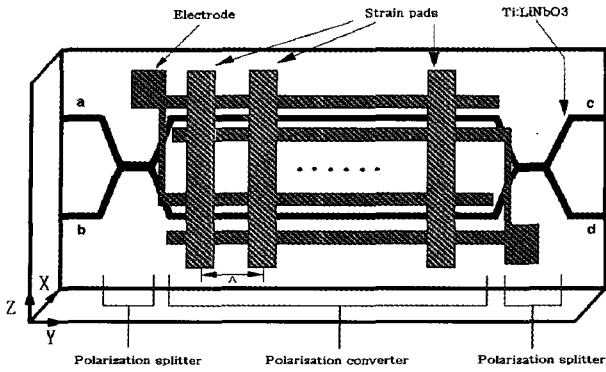


그림 6. 2x2 삽입/분기 스트레인광학 OADM의 설계 레이아웃.

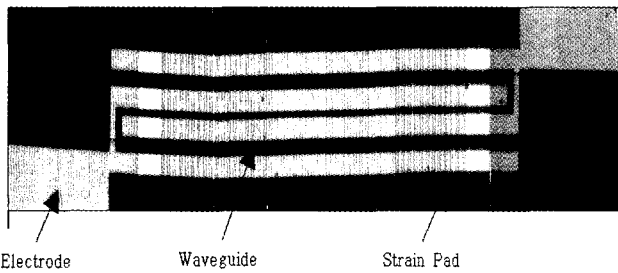
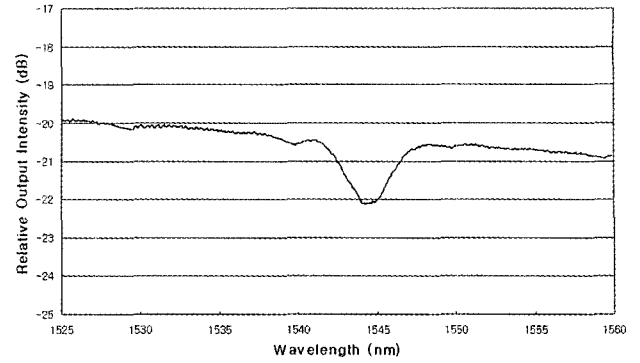


그림 7. 제작된 2x2 OADM 소자의 현미경 확대 사진.

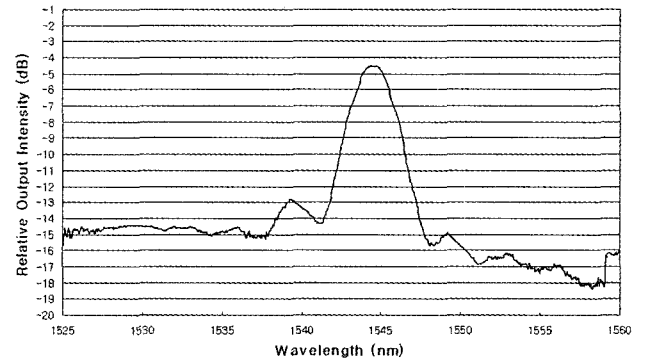
다. 이어서 다시 e-beam 증착장비를 이용해서 $\sim 1.1\mu\text{m}$ 두께의 SiO_2 박막을 300°C 온도에서 증착하고, RIE(reactive ion etcher) 장비를 이용해서 $21\mu\text{m}$ 주기를 갖는 SiO_2 패드를 형성하였다. 그림 7은 제작된 OADM의 현미경 확대사진이며, 소자 전체 길이는 41mm 이다.

제작된 소자의 동작 성능을 측정하기 위해서 BLS(broadband light source)와 광 스펙트럼분석기(OSA)를 이용해서 end-fire 결합장치를 구성하였다. 위상정합 조건을 만족하지 못하는 파장대역에서는 편광에 관계없이 입력포트 a(b)로 입사된 광파는 출력포트 c(d)로만 각각 출력되어야 하는데 제작된 소자의 경우에는 입사파의 일부 매우 미약한 파워가 원하지 않는 출력포트로 갈리는 것이 관찰 되었는데 이는 입·출력포트에 위치한 편광모드분리기가 완벽하게 편광모드를 분리하지 못하기 때문에 발생한 현상으로 이해되었다.

그림 8(a), (b)는 BLS를 입력포트 a로 입사시켜서 출력포트 d로 분기(drop)되는 스펙트럼과 이에 대응되는 출력포트 c의 스펙트럼을 측정한 것이다. 위상정합을 만족하는 1544.68nm 파장 성분이 분기되어 출력포트 d로 출력되었으며, 이 때 부 모드(sidelobe)레벨은 8.2dB , 통과대역폭 FWHM은 3.7nm 로 측정되었다. 예측한대로 소자는 동작하고 있으나, 부 모드레벨이 비교적 크고, 대역폭이 넓은 것은 소자를 구성하고 있는 편광모드분리기가 완벽하게 동작되지 못하고, Ti 확산공정 때 나타나는 out-diffusion을 완전하게 억제하지 못했기 때문인 것으로 사료된다. 한편 그림 9는 BLS를 입력포트 b로 입사시켜서 출력포트 c로 분기(drop)되는 스펙트럼과 이



(a)



(b)

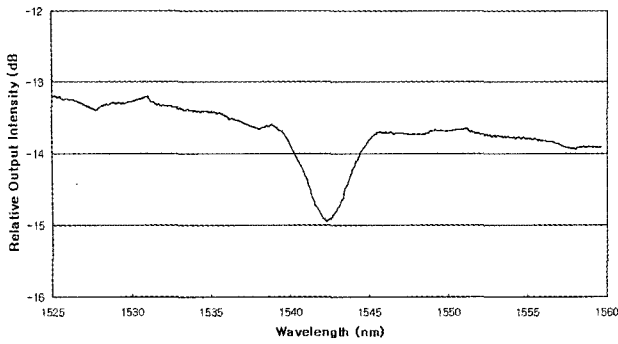
그림 8. 제작된 2x2 OADM 소자로부터 측정된 분기(drop) 특성: (a) 입력포트 a → 출력포트 c, (b) 입력포트 a → 출력포트 d.

에 대응되는 출력포트 d의 스펙트럼을 측정한 것이다.

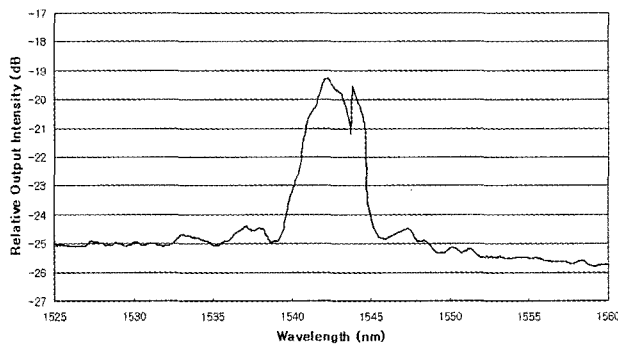
제작된 소자에 대해서 $-80\sim 100\text{V}$ 사이의 전압을 10V 간격으로 인가시켜서 파장가변 특성을 측정하였다. 전기광학효과에 의해서 두 TE, TM 모드 각각의 유효굴절률 n_e, n_o 가 γ_{33} 와 γ_{13} 서로 다른 전기광학계수 값에 의해서 변하게 되어 궁극적으로 식 (4)에서 보였듯이 위상정합이 일어나는 파장이 변하게 된다. 전압이 인가되지 않았을 경우 위상정합 파장은 1540.18nm 이며, $+100\text{V}, -80\text{V}$ 를 인가하였을 경우 파장은 각각 $1547.26\text{nm}, 1530.82\text{nm}$ 로 이동되었다. 따라서 그림 10과 같이 총 $\sim 17\text{nm}$ 정도의 파장범위를 가변시킬 수 있었으며, 그림 11로부터 파장 가변률은 0.094nm/V 로 측정되었다.

V. 결 론

Ti:LiNbO₃ 단일모드 채널 광도파로, 편광모드 분리기와 스트레인광학효과를 이용한 편광모드 변환기들을 집적화하여 1550nm 광통신 파장영역에서 편광에 관계없이 동작하는 파장가변 2x2 삽입/분기 광 멀티플렉서를 제작하였다. TE, TM 두 편광에 대해서 단일모드 특성을 갖는 채널 광도파로는 x-cut LiNbO₃에 Ti 확산 방법으로 제작하였으며, 채널 광도파로위에 배열된 SiO₂ 패드와 LiNbO₃ 기판 간에 나타나는 전단스트레인을 이용하여 편광모드변환기를 구현하였다. 한



(a)



(b)

그림 9. 제작된 2x2 OADM 소자로부터 측정된 분기(drop) 특성: (a) 입력포트 b → 출력포트 d, (b) 입력포트 b → 출력포트 c.

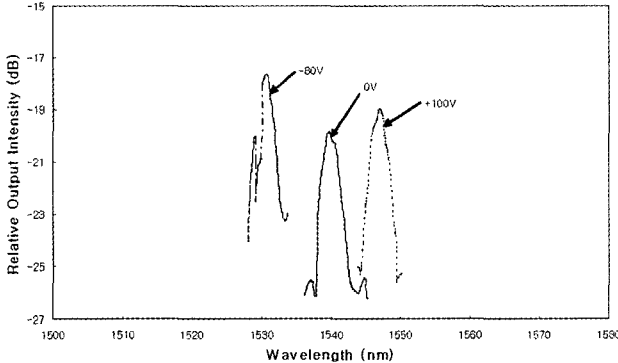


그림 10. 인가전압에 따른 OADM 소자의 파장가변 특성.

편 전기광학효과를 이용하여 위상정합에 해당되는 파장을 가변시키기 위해서 전압을 인가하여 광도파로의 복 굴절률을 변화시켰다. 0.094nm/V 파장 가변률과 최대 17 nm 파장을 가변시켰으며, 8.2dB 부 모드레벨과 3.72nm FWHM을 측정하였다.

제작된 소자는 예측한대로 동작되었으나, 비교적 높은 부 모드레벨과 넓은 통과대역폭이 측정되었는데 이는 다음과 같은 원인들 때문인 것으로 해석된다. 첫째 이유는 두 모드 간섭 원리에 기초한 편광모드분리의 동작성능은 두 모드 간섭영역의 폭과 유효굴절률에 매우 민감하게 영향을 받는데 이들을 최적화시키지 못한 것으로 예측된다. 둘째는 편광

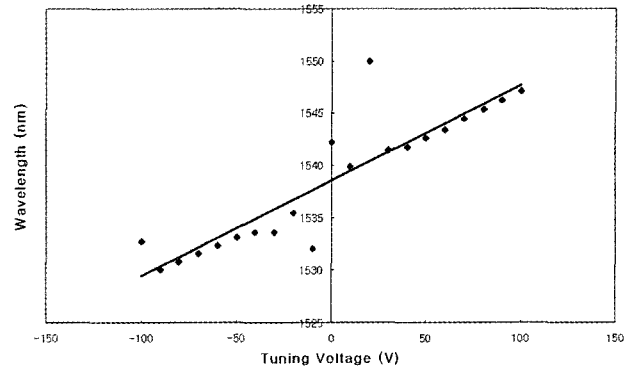


그림 11. 2x2 OADM 소자의 파장 가변률.

모드변환기에서 편광모드를 유발시키는 전단스트레인의 세기는 SiO₂ 패드 두께와 박막의 질과 밀접한 연관이 있는데, 본 연구에서 증착시킨 ~1.1 μ m 두께가 충분하지 않은 것으로 추측된다. 마지막으로 Ti 확산에 의해서 채널 광도파로 제작 때 일반적으로 나타나는 out-diffusion을 완벽하게 억제하지 못해서 이로부터 나타나는 기생 광도파로에 의해서 소자 성능이 전체적으로 나빠질 수가 있다. 앞서 언급한 이러한 문제점들을 해결할 경우 이론값과 매우 근접한 성능을 나타내는 소자를 구현할 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단(KRF-2005-041-D00571)의 지원과 2006학년도 홍익대학교 학술연구진흥비의 지원을 받아 수행된 연구임. 소자의 제작과 측정에 많은 도움을 주신 전자부품연구원(KETI), 나노바이오포토닉스팀의 이한영박사, 양우석박사, 김우경 연구원 및 정우진 위촉연구원께 감사드립니다.

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.*, 1999, 35, pp. 46-55.
- [4] J. M. H. Elmirghani 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] Hong-Sik Jung, "Ti:LiNbO₃ 2×2 optical add/drop multiplexers utilizing tilted film-loaded strip SiO₂ SAW waveguides in Ti:LiNbO₃," *Optical Engineering* 44(2), pp. 024601-024608, Feb. 2005.
- [7] Gi-Jo Jung, Jung-Hee Kim, and Hong-Sik 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] W. Warzanski, F. Heismann, and R. C. Alfemess, "Polarization-independent electrooptically tunable narrow-band wavelength filter," *Appl. Phys. Lett.* 53, pp. 13-15, 1988.
- [9] E. L. Wooten, R. L. Stone, E. W. Miles, and E. M. Bradely, "Rapidly tunable narrow-band wavelength filter using LiNbO₃ unbalanced Mach-Zehnder interferometers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, pp. 2530-2536, Nov. 1996.
- [10] Z. Tang, O. Eknayan, and H. F. Taylor, "Polarization-independent electrooptically tunable wavelength filter in LiTaO₃," *Electron. Lett.* Vol. 30, pp. 1758-1759, 1994.
- [11] P. Tang, O. Eknayan, and H. F. Taylor, "Rapidly Tunable Optical Add-Drop Multiplexer (OADM) Using a Static-Strain-Induced Grating in LiNbO₃," *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, No. 1, pp. 236-245, Jan. 2003.
- [12] Y. ping, O. Eknayan and H. F. Taylor, "Polarization-independent tunable bandpass filter utilizing symmetric branch beam splitters," *Electron. Lett.* Vol. 40, No. 15, pp. 1758-1759, 1994.
- [13] H. F. Taylor, "Tunable Spectral Slicing Filters for Dense Wavelength-Division Multiplexing," *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, No. 3, pp. 837-847, Mar. 2003.
- [14] H. S. Jung, O. Eknayan and H. F. Taylor, "Wavelength Tunable Polarization Mode Converter Utilizing Strain-Optic Effects in Ti:LiNbO₃," *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol. 38, Part 2, No. 12A, pp. L 1406-L1408, Dec. 1999.
- [15] 김정희, 정기조, 정홍식 이한영, "1.55 μ m Ti:LiNbO₃ 광도파로의 두 모드 간섭을 이용한 편광모드 분리기," *한국광학회지*, Vol. 13, No. 1, pp. 32-37, Feb. 2002.

2×2 Ti:LiNbO₃ Integrated Optical Add/Drop Multiplexers utilizing Strain-Optic Effect

Hongsik Jung[†], and Yongwook Choi

300 Shinan Jochiwon Yeongi Chungnam

[†]E-mail: hsjung@wow.hongik.ac.kr

(Received August 17, 2006, Revised manuscript October 11, 2006)

Polarization-independent Ti:LiNbO₃ 2×2 optical add/drop multiplexer for the 1550nm wavelength region is fabricated. The device consists of two input waveguides, two polarization beam splitters, two polarization conversion/electrooptic tuning waveguide sections, and two output waveguides. The single mode channel waveguides for both TE and TM polarizations are fabricated on a x-cut Ti:LiNbO₃ substrate by Ti diffusion. Spectral section is based on phase-matched polarization conversion due to shear strain induced by a thick SiO₂ grating overlay film. An applied voltage tunes the device by changing the waveguide birefringence, hence the optical wavelength at which most efficient polarization conversion occurs. Tuning rate of 0.094nm/V with a maximum range of 17nm has been obtained. The nearest side-lobe is about 8.2dB. The FWHM is 3.72nm.

OCIS code : 130.0130. 130.2790. 130.3060. 130.3120. 130.3730.