

LiNbO₃의 스트레인광학효과를 이용한 모드변환형 편광무관 광여파기에 관한 연구

정희원 김대웅*, 정홍식**

A Study on the Mode Convertible, Polarization Independent Optical Filter Utilizing Strain-Optic Effect in LiNbO₃

Daewoong Kim*, Hongsik Jung** *Regular Members*

요약

Ti:LiNbO₃ 채널형 광도파로, 스트레인광학효과를 이용하는 편광모드 변환기와 광도파로의 복굴절을 변화시키는 전기광학효과를 이용하여 1.55 μ m 파장영역에서 동작하는 모드변환형 편광무관 광여파기 제작하였다. 300 $^{\circ}$ C 온도에서 1.5 μ m 두께의 SiO₂를 증착하여, 이로부터 발생하는 전단 스트레인을 이용하여 편광모드 변환기를 구현하였으며, 모드변환이 일어나는 파장을 가변시키기 위하여 전기광학효과에 의해서 모드변환기의 광도파로 복굴절을 변화시켰다. 9 μ m 폭의 광도파로와 19.4 μ m 주기를 갖는 400개의 SiO₂ 패드로 제작된 모드변환형, 편광무관 광여파기는 1564nm 파장에서 입사 TM 모드일때 12dB 정도의 TE 모드변환을 측정하였으며, 편광무관형 파장가변 광여파기로서의 가능성을 확인하였다.

ABSTRACT

Mode convertible, polarization-independent optical filters at 1.55 μ m wavelength have been fabricated by polarization mode converters utilizing Ti:LiNbO₃ optical waveguides and strain-optic effect, and electrooptic effect to change the birefringence. The polarization mode converters was realized by utilizing the shear strain from an evaporated 1.5 μ m periodic SiO₂ thin film at 300 $^{\circ}$ C, and electro-optically tuning the wavelength for maximum polarization conversion via the electrooptic effect. The 12dB TM \rightarrow TE mode conversion was measured at λ =1564nm for the device having 9 μ m waveguide width and 400 periodic pads with 19.4 μ m period.

I. 서론

광통신 기술의 발달로 최근 광대역 전송과 교환 기술이 복합된 광대역 종합정보통신망(B-ISDN) 기술이 급속히 발전되고 있으며, 이것은 향후 초고속 정보통신망의 구축을 이루어 갈 것으로 전망된다. 이러한 전송장치의 전송용량을 대폭 높이기 위하여 다양한 다중화 방법들이 연구되고 있으며, 이에 하나로서 광주파수분할 다중화(OFDM: optical frequ-

ency division multiplexing) 방식에 집중적으로 많은 연구가 진행되고 있다. OFDM 전송방식은 파장 분해능력에 따라 WDM (wavelength division multiplexing), HDWDM(high density WDM), CMC (coherence multi-channel) 전송방식으로 분류된다. WDM을 구현하기 위해서는 송신단에서 각각 다른 파장의 신호를 하나의 광섬유에 보낼 수 있는 광결합기와, 수신단에서는 송신단에서 보낸 단일 파장의 신호만을 선택할 수 있는 파장가변 광필터

* 홍익대학교 대학원 전자전신공학과

** 홍익대학교 과학기술대학 전자전기컴퓨터공학과

논문번호: 98269-0629, 접수일자: 1998년 6월 29일

* 본 연구는 서울대학교 반도체공동연구소의 반도체분야 교육부 학술연구조성비(97-E-4035)에 의해 수행되었음.

가 필요하다. 이와 같이 WDM의 구성기술에 있어서 파장가변 광필터의 개발은 향후 100Gbps급 광전송시스템 구현에 필요한 핵심소자이며, 광필터의 성능향상은 광전송시스템의 성능과 직접 연관되어 다양한 광다중방식의 발전을 가능케 하는 요소가 된다.¹⁾²⁾

광섬유를 이용한 가변 광필터는 Fabry-Perot 간섭계³⁾ 또는 Mach-Zehnder 간섭계⁴⁾ 형태로 제작되었으며, 낮은 삽입손실과 적은 편광 의존성과 같은 장점을 가지고 있지만 파장가변속도가 msec 정도로 느다. Ferroelectric 재료를 이용해서 개발된 기존의 가변광여파기는 LiNbO₃의 전기광학효과(electrooptic effect)⁵⁾, 음향광학효과(acoustooptic effect)⁶⁾ 등을 이용하여 왔다. 이러한 필터들의 동작은 광파의 편광모드 변환에 의존하고 있으며, 연속적으로 전기 에너지를 공급받아야만 동작이 가능할 뿐만 아니라, 소자의 동작특성이 편광상태에 따라 크게 영향을 받는다.

본 논문에서는 LiNbO₃가 보유하고 있는 광학적 성질들 중에서 전기광학효과와 스트레인광학효과(strainoptic effect)를 이용하여 편광상태에 관계없이 동작하는 모드변환형 파장가변 광여파기 구현에 관해서 서술하였다. 지금까지 본 논문에서 제시한 소자와 같은 원리 및 유사한 구조의 편광무관형 파장가변 광여파기에 대한 연구가 Z. Tang 등에 의해 LiTaO₃를 이용하여 수행 되었으나⁷⁾, LiNbO₃를 이용한 소자제작과 1550nm 파장영역에서의 측정은 국 내외에서 아직 보고된 바가 없다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 모드변환형 편광무관 광여파기의 동작원리와 LiNbO₃의 스트레인광학효과에 의한 편광모드 변환기를 이론적으로 검토하였으며, 3장에서는 소자 제작공정을, 4장에서는 실험결과를 검토, 분석한 다음, 결론을 5장에 실었다.

II. 모드변환형 편광무관 광여파기 구조와 스트레인광학 효과

그림 1은 LiNbO₃를 이용하여 본 연구에서 설계한 모드변환형 편광무관 광여파기의 전체적인 구조이며, 입, 출력단에 위치한 두 개의 편광모드 분리기와 그 사이에 위치한 두 개의 편광모드 변환기로 구성되어 있다. 입력단 a에 임의의 편광상태로 입사된 광파($\lambda 1, \lambda 2, \lambda 3$)는 입력단에 위치한 편광모드 분리기에서 TE/TM 모드로 분리되어, 파장에 관계

없이 TM($\lambda 1, \lambda 2, \lambda 3$) 모드 성분은 도파로 1로 진행되며, TE($\lambda 1, \lambda 2, \lambda 3$) 모드 성분은 도파로 2로 천이 되어 진행된다. 도파로 1에 위치한 편광모드 변환기는 특정파장에서 TM($\lambda 1$) 모드를 TE($\lambda 1$) 모드로 변환시키며, 도파로 2에 위치한 편광모드 변환기는 특정파장에서 TE($\lambda 1$) 모드를 TM($\lambda 1$) 모드로 변환시키게 된다. 한편 $\lambda 2, \lambda 3$ TM, TE 모드 성분은 모드변환 없이 그대로 모드변환기를 통과하게 된다. 출력단에 위치한 편광모드 분리기에서 도파로 1의 TE($\lambda 1$) 모드는 도파로 2로 천이되어 진행하게되고, 도파로 2의 TM($\lambda 1$) 모드는 같은 도파로내로 진행하여 궁극적으로 출력단 d에서는 TE/TM 모드($\lambda 1$)가 동시에 출력되어 입사광파와 동일한 편광상태의 파장 $\lambda 1$ 모드가 나오게 된다. 따라서 입력단의 편광상태에 관계없이 출력단 d에서는 입력단과 같은 편광을 유지하게 된다. 한편 출력단 c에서는 $\lambda 2, \lambda 3$ 입사광파가 나오게된다. 편광모드 변환기에서 모드변환이 일어나는 특정파장 성분을 가변시킬 경우, 그림 1의 소자는 파장가변형 광여파기로 동작하게 된다.

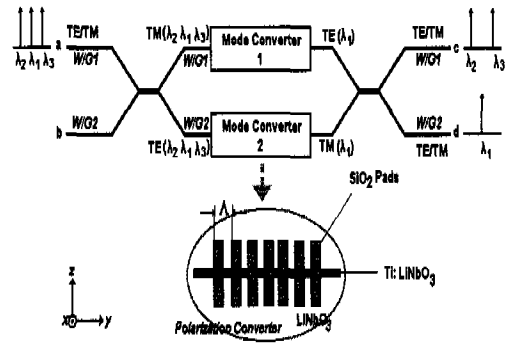


그림 1. 모드변환형 편광무관 광여파기의 구조 및 동작 원리

그림 1과 같은 구조에서 핵심적인 역할을 하는 편광모드 변환기의 동작원리는 스트레인광학효과와 관련하여 다음과 같이 이해될 수 있다. Ti 확산으로 제작된 단일모드 광도파로에 1.5-2 μ m 두께의 SiO₂ 박막을 그림 1의 원안에 있는 구조와 같이 주기적으로 형성한다. 이 경우에 주기형 박막과 기판간의 열팽창계수가 다르기 때문에 스트레인이 발생되며, 특히 주기적 구조로 부터 나타나는 전단스트레인(shear-strain)의 섭동(perturbation)에 의하여 LiNbO₃ 굴절률 텐서에서 n₅가 새롭게 생성되어 광도파로를

따라 진행되는 두 직교 편광모드간에 결합이 일어나게 된다. LiNbO₃의 스트레인광학계수(strain-optic coefficient)의 텐서 matrix는 다음과 같다.⁸⁾

$$\begin{bmatrix} \Delta(\frac{1}{n^2})_x \\ \Delta(\frac{1}{n^2})_y \\ \Delta(\frac{1}{n^2})_z \\ \Delta(\frac{1}{n^2})_{yz} \\ \Delta(\frac{1}{n^2})_{zx} \\ \Delta(\frac{1}{n^2})_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} & 0 & 0 \\ P_{12} & P_{11} & P_{13} & -P_{14} & 0 & 0 \\ P_{31} & P_{31} & P_{33} & 0 & 0 & 0 \\ P_{41} & -P_{41} & 0 & P_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{44} & P_{41} \\ 0 & 0 & 0 & P_{14} & \frac{P_{11}-P_{12}}{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \\ S_{yz} \\ S_{zx} \\ S_{xy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

특히 그림 1의 편광모드변환기 구조에서는 전단 스트레인 S_{xy}가 생성되어, Δ(1/n²)_{xz} 성분이 새롭게 나타나게 되며, 이 성분은 x, z축 방향으로 편향된 편광모드 즉 TE, TM 모드를 서로 결합시키게 된다. 따라서 굴절률 텐서중에서 n₅가 새롭게 생성되며, 다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$n_5 = \Delta(\frac{1}{n^2})_{xz} = -(\frac{n^3}{2}) \cdot P_{41} \cdot S_{xy} \quad (2)$$

위 식에서 n=(none)1/2로 정의되며, n_o, n_e는 LiNbO₃의 정상(ordinary)과 비정상(extraordinary) 모드의 굴절률이다. S_{xy} 값은 일반적으로 음의 값을 갖기 때문에 궁극적으로 n₅는 양의 값이된다. 따라서 굴절률 타원체 (index ellipsoid) 식은 다음과 같이 변형된다.

$$\begin{aligned} & [\frac{1}{n_o^2}]_x \cdot x^2 + [\frac{1}{n_o^2}]_y \cdot y^2 + [\frac{1}{n_e^2}]_z \cdot z^2 \\ & - (\frac{n^3}{2}) \cdot P_{41} \cdot S_{xy} \cdot xz = 1 \end{aligned} \quad (3)$$

위 식에서 xz항은 스트레인에 의해서 변형된 굴절률 타원체의 결정축이 기존의 결정축 x, y, z와 같지 않음을 나타내며, 이것은 두 직교 편광이 서로 결합하고 있는 것으로 해석할 수 있다.

주기적인 형태로 유전체 박막을 배열하여, 스트레인이 주기적으로 발생시키는 이유는 다음과 같다. LiNbO₃는 결정축 방향에 따라 굴절률이 다른 복굴절(birefringence) 결정이기 때문에 x, z 결정축 방향에 따라 편향된 TE, TM 모드의 유효굴절률이 다르며, 따라서 전파속도 또한 달라지게 된다. 이러한 현상을 위상부정합(phase mismatch)이라 일컫는다.

그러나 TE, TM 모드간에 결합이 효과적으로 일어나기 위해서는 위상이 정합되어야 하며, 이를 인위적으로 구현하기 위해서 Bragg 조건이 만족될 수 있도록 그림 1과 같이 주기적인 패드구조를 이용하였다. Bragg 조건식은 아래와 같다.⁹⁾

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

여기서 λ는 입사광파의 파장이며, Δn은 TE, TM 모드의 굴절률차이며, LiNbO₃의 경우에는 ~0.08의 값을 갖는다. 특히 주기 Λ와 Δn 값이 정해질 경우, 모드변환은 특정파장에 대해서 일어나게 되며, 따라서 파장 광여파기로 동작하게 된다. 한편 Δn은 결정의 조성비와 주위 온도에 따라 달라질 수 있기 때문에 적당한 주기로 유전체 박막을 제작한 후에 나타날 수 있는 미세한 위상부정합은 온도 또는 입사광파의 파장을 변화시켜서 조절할 수 있다. 광의 중심파장 λ=1550nm에서 LiNbO₃의 복굴절률이 none=0.073인 경우에는 SiO₂ 패드의 주기는 21.2μm임을 알 수 있다.

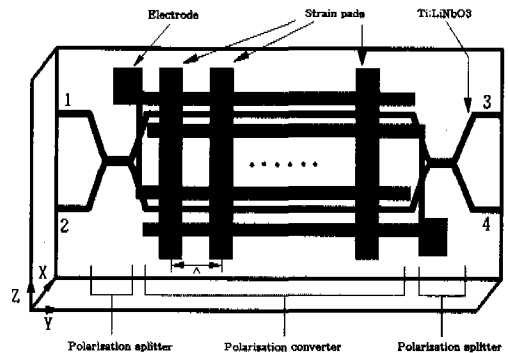


그림 2. 편광무관형 가변파장 광여파기의 레이아웃.

그림 2와 같이 편광모드 변환기를 구성하고 있는 두 채널 도파로 양옆에 전극을 배열할 경우, 전기광학효과에 의해서 모드변환이 가장 효율적으로 일어날 수 있는 파장을 선택적으로 가변시킬 수 있게 된다. 즉 고정된 패드주기 Λ에 대해서 Δn 값이 변하게 되면, 이에 대응하여 편광모드 변환이 일어나는 파장 λ도 바뀌게 된다. 궁극적으로 인가전압에 의해서 모드변환이 일어나는 파장을 가변시킬 수 있게 된다. 전극에 적당한 전압 V_T를 인가시키면, Z 축 방향으로 생성된 전계 E_z가 전기광학효과에 의해서 TE, TM 모드에 대해서 각각의 유효굴절률

을 변화시키게 되며, 이때 각 모드에 대한 굴절률 변화량은 다음과 같다.

$$\Delta n_i = -\frac{1}{2} (n_i^3) \cdot r_{33} \cdot E_z = -\frac{1}{2} (n_i^3) \cdot r_{33} \cdot \left(\frac{V_T}{g}\right) \quad (5)$$

여기서 n_i 는 전기광학계수, g 는 전극의 간격이다. 첨자 i 가 1일 경우 Δn_1 은 TM 모드에 해당되는 굴절률 변화량이며, 이에 대응해서 유효굴절률과 전기광학계수는 n_o, r_{13} 로 바뀐다. 한편 첨자가 3일 경우 Δn_3 은 TE 모드에 해당되는 굴절률 변화량이며, 이에 대응해서 유효굴절률과 전기광학계수는 n_e, r_{33} 로 바뀐다. 위상정합하에서 모드변환이 최대 되었을 경우 전압으로 파장을 가변시킬 수 있는 파장 변화율은 다음과 같다.

$$\frac{d\lambda}{dV_T} = \frac{1}{2} [\Gamma_{TE} \cdot (n_3^3) \cdot r_{33} - \Gamma_{TM} \cdot (n_1^3) \cdot r_{13}] \cdot \left(\frac{\lambda}{g}\right) \quad (6)$$

여기서 Γ_{TE}, Γ_{TM} 은 TE, TM 모드와 전계간에 중첩(overlap) 되는 정도를 나타내는 상수이며, 광도파로와 전극 구조 및 도파로와의 배열에 따라 약 0.3 - 0.5 정도의 값을 갖는다.

정리하면, 주기적인 패드의 배치로 전기 에너지 공급 없이 TE/TM 모드간의 결합을 유도 할 수 있으며, 전극에 인가된 전압에 따른 전기광학 효과를 이용하여 가장 효과적으로 모드 결합이 일어날 수 있는 파장을 바꿀 수 있다.

III. 제작공정

1.3-1.55 μ m 파장영역에서, 단일모드 도파특성을 갖는 그림 1과 같은 광도파로 구조를 제작하기 위해서, 1.5 cm \times 3.0cm 크기의 x-cut LiNbO₃ 기판위에 1300 Å 두께의 Ti을 E-beam 증착기로 증착한 다음, 사진식각공정과 습식식각을 이용해서 Ti 패턴을 형성하고, 1050oC 온도에서 8시간 동안 확산을 수행하였다. 고온 확산시 Li의 outdiffusion 때문에 나타나는 기생도파로를 억제하기 위해서 wet-O₂ 분위기에서 확산을 수행하였으나, outdiffusion을 완전히 억제하지는 못하였다. End-fire 결합시스템을 이용하여, 제작된 도파로의 도파 실험을 수행하기 위해서, 도파로의 양 입사단면을 optical-grade 수준으로 연마하였다. 이어서 PE-CVD 증착장비를 이용하

여 1.5 μ m 두께의 SiO₂를 300°C 온도에서 증착한 후, 사진식각공정과 HF와 NH₄F를 함유하고 있는 7:1 Buffered Oxide Etchant(B.O.E)를 사용한 습식식각으로 주기 패드를 형성하였다. 이 공정단계에서 그림 1과 같은 소자가 제작되었다. 이어서 파장가변 광여파기를 제작하기 위해서 진공증착기로 2000 Å 두께의 Al을 증착하여 그림 2와 같이 도파로 양옆에 전극을 배열하였다. 전 공정에서 3개의 photo-mask를 사용하였으며, 그림 3은 최종적으로 제작된 소자의 사진이다. End-fire 결합시스템의 입력력단에 편광모드 분리기(PBS)를 배치하여 그림 4와 같은 측정시스템을 구성하였다.

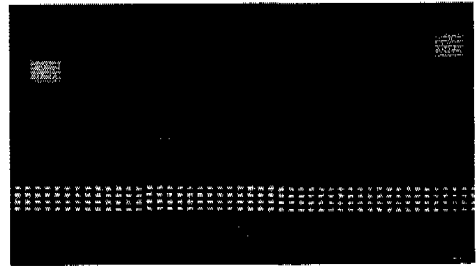


그림 3. 제작된 모드변환형 편광무관 광여파기의 사진

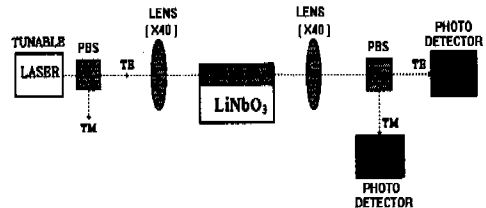


그림 4. End-fire 결합측정 시스템의 레이아웃

IV. 실험결과 및 검토

그림 2의 편광무관형 가변파장 광여파기를 실험하기 전에 비교적 측정이 수월한 그림 5의 편광모드 변환기를 0.63 μ m He-Ne 레이저와 그림 4의 측정시스템을 이용하여 온도에 따른 편광모드 변환을 측정하였다. 측정된 소자의 제원은 7 μ m 폭의 광도파로와 350개의 SiO₂ 주기패드로 제작하였으며, 그림 6에 나타난 변환효율은 정규화시킨 것이다. 측정시 TE 모드를 입사시켜서, 출력되는 TM 모드를 측정하였다. 전압을 인가하지 않은 경우에는 21°C서 최

대 변환효율이 측정되었으며, 30V 전압을 인가한 경우에는 최대 변환효율이 46°C에서 관찰되었다. 그림 6에서 보이는 바와 같이 모드변환이 최대로 일어나는 온도에서 좌우가 대칭되지 않는 이유는 7 μ m 폭으로 제작된 광도파로가 0.63 μ m 파장에서 다중모드 도파 특성을 나타냈기 때문이며, 변환효율이 고르지 못하고 변동이 심한 것은 측정시 LiNbO₃ 기판의 열분포가 고르지 못해서 나타나는 현상으로 생각된다. 위와 같이 온도 조절로 위상 정합을 시도할 경우 복굴절($\Delta n = |n_e - n_o|$)에서 이상광의 굴절을 n_e 가 변화되며, 궁극적으로 Δn 의 값을 변화시킬 수 있다. LiNbO₃는 $d(|n_e - n_o|)/dT \sim -3.1 \times 10^{-5}$ 비율로 온도에 따라 변한다. 위 결과에서 인가 전압에 따라 전기광학효과에 의해서 복굴절을 Δn 이 변화였으며, 따라서 위상정합이 일어나는 온도 또한 변화됨을 알 수 있다. 한편 인가전압에 따라 변경된 위상정합 조건은 식 (4)에서도 알 수 있듯이 파장을 가변시켜서 정합을 시도할 수도 있으므로, 그림 5의 소자는 입 출력단에 편광모드 분리기를 위치시킬 경우 편광모드변환형 가변파장 광여파기로서 동작할 수 있을 것이다.

한편 주기패드 갯수에 따른 변환효율을 비교한 결과, 주기패드의 수가 많을수록 모드변환이 온도 또는 파장에 민감하게 영향을 받으며, 모드변환 파장 대역폭이 좁아지고 그 경사가 급해짐을 알 수 있었다. 위와 같은 사실로 볼 때 이러한 온도에 민감한 형태의 광소자를 실용화 할 경우 TEC(Thermo Electric Cooler)와 같은 소자를 이용하여, 자동으로 온도를 조절 할 수 있게 하는 것이 필요하다.

그림 5와 같은 편광모드 변환기를 이용한 그림 2의 편광무관 광여파기 또한 파장 가변형으로 동작된다. 그림 2의 모드변환기에 적당한 전압을 인가하여 모드변환이 일어나는 파장을 선택적으로 가변시킬 수 있다.

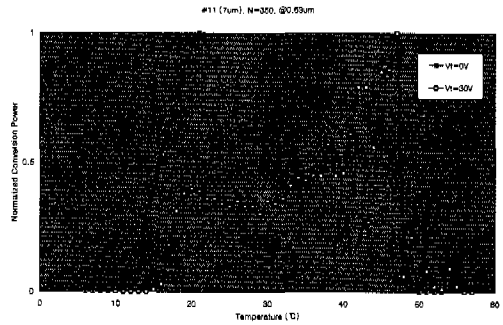
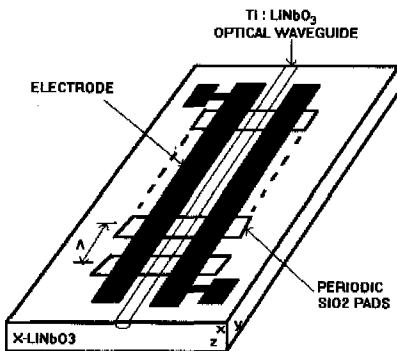


그림 5. 인가전압과 온도변화에 따른 정규화된 변환효율

1.55 μ m 파장영역의 가변파장 레이저와 그림 4와 같은 측정시스템을 구성하여, 편광무관형 가변파장 광여파기의 동작특성을 실험하였다. 본 실험에서 입사모드를 TM 모드로 하여 출력단에서 TM 모드의 억압비를 APD 검파기를 이용하여 측정하였다. 이 경우 TM 모드의 억압비에 비해 TE 모드의 모드 변환이 이루어졌으리라 생각할 수 있다. 먼저 측정에 사용된 소자는 9 μ m 폭의 광도파로와 19.4 μ m 주기를 갖는 400개의 SiO₂ 패드로 제작하였다. 그림 6에서 측정된 바와 같이 1564nm 파장에서 약 12dB 정도의 TE 모드 변환이 측정되었다.

한편 8 μ m 폭의 광도파로와 20 μ m 주기를 갖는 300개의 SiO₂ 패드로 제작된 소자의 경우에는 1572nm 파장에서 약 10dB의 TE 모드 변환이 측정되었다. 본 측정에서 사용된 파장가변 레이저가 1575nm 파장영역 부근에서 출력 광파워가 급격하게 감소되어, 그 이상의 파장영역에서는 정확하게 측정을 할 수가 없었다.

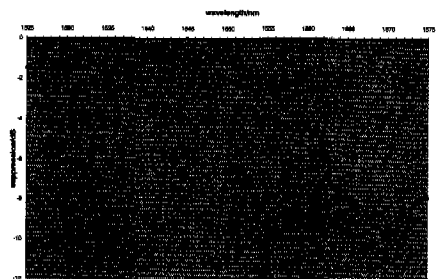


그림 6. 파장변환에 따른 TM-TE 모드 변환. $w=9 \mu$ m, $N=400$, $\Lambda=19.4 \mu$ m

참고로 Z. Tang 등이 LiTaO₃로 제작한 본 논문과 유사한 구조를 가진 편광 무관형 가변파장 광여파기의 경우, 전기광학효과를 이용하여 중심 파장을

655nm부터 692nm까지 가변시켰으며(0.4nm/V), 11 nm의 반치폭(FWHM)을 얻었다.⁷⁾

현재까지의 측정 결과로는 TE/TM 양모드에 대한 도파특성이 좋은 광도파로의 제작, 편광모드 분리기와 편광 모드 변환기에 대한 최적화 등의 해결 문제가 남아 있지만, 앞으로 이러한 문제를 해결할 경우 편광무관형 가변파장 광여파기로 활용될 수 있으리라 기대된다.

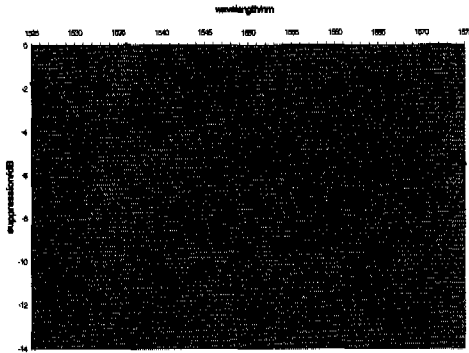


그림 7. 파장변환에 따른 TM-TE 모드 변환. $w=8\mu\text{m}$, $N=300$, $\Lambda=20\mu\text{m}$

V. 결론

Ti:LiNbO₃ 채널형 광도파로, 스트레인광학효과와 전기광학효과를 이용하여 편광모드 변환기와 편광무관형 가변파장광여파기를 구현하였으며, 인가 전압에 따른 복굴절을 변화로 나타나는 위상부정합을 파장을 가변시켜서 위상정합을 구현할 경우 파장가변형 광여파기로 동작됨을 확인하였다. 300°C 온도에서 증착된 SiO₂를 위상정합에 필요한 주기로 박막패드를 제작하여, 편광모드 결합에 필요한 전단 스트레인을 생성시켰다. 7 μm 폭의 광도파로와 350개의 SiO₂ 주기패드로 제작된 편광모드 변환기를 0.63 μm He-Ne 레이저와 결합하여 모드변환을 측정하였다. 전압을 인가하지 않았을 때에는 21°C에서 최대 변환효율이 측정되었으며, 30V 전압을 인가한 경우에는 최대 변환효율이 46°C에서 관찰되었다. 9 μm 폭의 광도파로와 19.4 μm 주기를 갖는 400개의 SiO₂ 패드로 제작된 편광무관형 가변파장 광여파기는 1564nm 파장에서 약 12dB 정도의 TE 모드 변환이 측정되었으며, 제작된 소자는 편광무관형 가변파장 광여파기로 활용될 수 있으리라 기대된다.

참고 문헌

- [1] Charles A. Brackett, et al, "A scalable multiwavelength multihop optical network: a proposal for research on all-optical networks," *Journal Lightwave Technol.*, vol. 11, No. 56, pp. 736-753, May 1993.
- [2] L. D. Garrett, et al, "Performance of 8-Channel OEIC Receiver Array in 8 x 2.5 Gb/s WDM Transmission Experiment," *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 9, No. 2, Feb. 1997.
- [3] J. Stone, L.W. Stulz, "Pigtailed High-Finesse Tunable Fibre Fabry-Perot Interferometers with Large, Medium and Small Free Spectral Range," *Electron. Lett.*, pp. 781-782, 8th June, 1987.
- [4] Ed L. Wooten, et al, "Rapidly Tunable Narrowband wavelength Filter Using LiNbO₃ Unbalanced Mach-Zehnder Interferometers," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 14, No. 11, pp. 2530-2536, Nov. 1996.
- [5] W. Warzanskyl, F. Heismann, and R.C. Alfarness, "Polarization-independent electro optically tunable narrow-band wavelength filter," *Appl. Phys. Lett.*, 53(1), 4 July 1988.
- [6] D.A. Smith, J.E. Baran, K.W. Cheung, and J.J. Johnson, "Polarization-independent acoustically tunable optical filter," *Appl. Phys. Lett.*, 56(3), 15 Jan. 1990.
- [7] Z. Tang, O. Eknayan and H. F. Taylor, "Polarization-independent electro-optically tunable wavelength filter in LiTaO₃", *Electron. Lett.*, Vol. 30, No. 21, pp. 1758-1759, Oct. 13, 1994.
- [8] K. Yamanouchi, K. Wakazono, and K. Shibayama, "Optical Surface Wave Mode Converters and Modulators Utilizing Static Strain-Optic Effects," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-16, No. 6, Jun. 1980.
- [9] Booth, R.C., Daymond-John, B.E., Sturges, P.E., and Wilson, M.G.F. "Temperature tuning of LiNbO₃ electro-optic waveguide TE/TM mode converters", *Electron. Lett.*, Vol. 20, pp.

