

LiNbO₃ 음향광학효과를 이용한 파장가변 광여파기 설계 및 제작

정희원 송석호*, 정홍식**

The design and fabrication of the tunable wavelength optical filter utilizing LiNbO₃ acoustooptic effect

Suk-Ho Song* , Hong-Sik Jung** *Regular Members*

본 연구는 정보통신부 97년도 대학기초연구비(1차년도) 지원에 의해서 수행되었습니다.

요약

9 μ m 폭의 Ti:LiNbO₃ 채널형 광도파로와 21.2 μ m 주기의 교차지트랜스듀서(IDT) 전극구조를 이용하여 AOTF를 제작하였다. =1.33 μ m의 입사광원과 N=50, W=120 μ m, L=22mm 제원의 IDT로 제작된 소자의 경우, SAW의 중심파장과 RF 구동전력 210MHz, 366mW에서 16.5dB의 모드변환이 측정되었으며, N=10, W=4.8mm, L=22mm의 IDT로 제작된 소자의 경우에는 215MHz 중심파장에서 12.5dB의 모드변환이 확인되었다.

ABSTRACT

AOTFs have been fabricated on x-cut LiNbO₃ utilizing 9 μ m width Ti-indiffusion channel waveguides and 21.2 μ m periodic interdigital transducer (IDT) electrodes. The measured performances with IDT(N=50, W=120 μ m, L=22mm) at the optical center wavelength of 1.33 μ m show a 16.5dB TE \rightarrow TM mode conversion at the acoustic center frequency of 210MHz and the RF driving power of 366mW. The AOTF with IDT(N=10, W=4.8mm, L=22mm) shows the 12.5dB mode conversion at the acoustic center frequency of 215MHz.

I. 서론

광통신 기술의 발달로 최근 광대역 전송과 교환기술이 복합된 광대역 종합정보통신망 (B-

ISDN) 기술이 급속히 발전되고 있으며, 이것은 향후 초고속 정보통신망의 주축을 이루어 갈 것으로 전망된다. 이러한 전송장치의 전송용량을 대폭 높이기 위하여 다양한 다중화 방법들이 연구되고 있으며, 이에 하서 광주파수분할 다중화 (OFDM: optical frequency division multiplexing) 방식에 집중적으로 많은 연구가 진행되고 있다. OFDM 전송방식은 파장 분해능력에 따라

* 홍익대학교 대학원 전자전산공학과
 ** 홍익대학교 전자전기컴퓨터공학부
 論文番號:98172-0416
 接受日字:1998年 4月 16日

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 있도록 해주는 광결합기와, 수신단에서는 송신단에서 보낸 단일 파장의 신호만을 선택할 수 있는 파장가변 광필터가 필요하다. 이와 같이 WDM의 구성기술에 있어서 파장가변 광필터의 개발은 향후 100Gbps급 WDM, HDWDM, CMC등 광전송시스템 구현에 필요한 핵심소자이며, 광필터의 성능향상은 광전송시스템의 성능과 직접 연관되어 다양한 광다중방식의 발전을 가능케 하는 요소가 된다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾

지금까지의 대부분 가변 광필터는 Fabry-Perot 간섭계 또는 Mach-Zehnder 간섭계 원리를 이용하여 광섬유 형태로 제작되었으며, 낮은 삽입손실, 적은 편광 의존성과 같은 장점을 나타내고 있지만, 파장가변 속도가 msec 정도로 늦으며, 채널을 하나밖에 선택할 수가 없다. 소자의 구조와 파장가변 방법에 따른 특징, 스위칭 속도 및 장단점을 도표 1에 요약하였다.⁽⁴⁾⁻⁽⁵⁾

음향광학효과(Acousto-Optic Effect)를 이용한 편광 모드 변환형 가변파장 광필터(AOTF: Acousto-Optic Tunable Optical Filter)는 200nm 이상의 넓은 파장가변 범위, 1~2nm 정도의 좁은 파장 대역폭, μsec 정도의 비교적 빠른 가변속도 그리고 동시에 다수의 채널등을 선택할 수 있는 등 여러 가지 장점 때문에 많은 관심을 받아왔다.⁽⁶⁾ 현재까지 AOTF와 관련해서 국외에서 발표된 논문은 음향파 장벽(acoustic barrier)을 이용하여 표면음향파(SAW: Surface Acoustic Wave) 파워를 줄이는 것과 부모드(side mode) 레벨을 감소시키기 위한 가중결합(weighted coupling) 방법에 초점을 맞추어 많은 연구가 진행되어왔다. 한편 본 연구에서는 앞에서 언급한 수준의 연구를 수행하기에 앞서, 결합모드이론(coupled-mode theory)을 이용하여 AOTF의 동작원리를 검토하였으며, Ti:LiNbO₃ 채널 광도파로와 교차지트랜스듀서(IDT: InterDigital Transducer) 전극구조를 이용하여 비교적 단순한 구조의 AOTF를 제작하고, 그 성능을 측정하였다.

II. AOTF의 동작원리

음향광학효과를 이용하는 파장가변광필터의 동작은 표면 음향파를 이용하여 발생시킨 복굴절 섭동(birefringence perturbation)이 편광모드간에 결합 및 변환시키는 원리를 이용하고 있다. 따라서 TE_x→TM 모드 변환기를 광파장 여파기로 활용하기 위해서 그림 1과 같이 편광모드 분리기(PBS: Polarization Beam Splitter)를 변환기 앞뒤에 배열시켜야만 가능하다. 한편 LiNbO₃와 같은 복굴절 기판에 제작된 광도파로를 따라 진행되는 두 편광모드는 서로 다른 굴절률값을 나타내기 때문에 진행속도 또한 다르다. 따라서 두 편광간에 위상정합이 이루어질 때 완전한 편광모드 변환을 얻을 수가 있다. 즉 음향파의 모멘텀이 편광간의 위상부정합을 보상시킬 때 비로써 완전한 모드 결합이 일어난다. 따라서 두 편광모드간의 결합 거리는 다음과 같이 정의된다.^{(7)*}

$$L_b = \frac{\lambda}{|n_{TE} - n_{TM}|} = \frac{\lambda}{|\Delta n|} \quad (1)$$

위식에서 n_{TM} 과 n_{TE} 는 복굴절 기판의 TM, TE 모드 굴절률이며, λ 는 광파의 파장이다. 한편 표면 음향파는 교차지트랜스듀서 구조에 의해서 발생시킬 수 있으며, 이때 SAW의 주기는 $\Lambda = V_s/f_s$ 로 정의되며, V_s, f_s 는 표면음향파의 속도, 주파수이다. 따라서 아래 식과 같이 결합 길이, L_b 와 SAW의 주기, Λ 와 같을 때 완전 모드변환이 일어난다.*

$$L_b = \Lambda \quad (2)$$

따라서 식(2)를 만족할 때 편광모드 변환과정은 공진 특성을 나타내며, 공진에 해당되는 파장대역 $\Delta\lambda$ 는 좁으며, 공진대역은 다음과 같이 정의된다.*

$$\Delta\lambda = \frac{0.8\lambda^2}{L\Delta n} \quad (3)$$

여기서 L 은 편광결합이 일어나는 소자전체 길이에 해당된다. Δn 은 결정의 조성비와 동작온도에 따라 달라질 수 있기 때문에 이론적 근거로 계산된 주

기로 전극구조를 제작한 후에 나타날 수 있는 미세한 위상부정합은 온도 또는 입사 광파의 파장을 변화시켜서 조절할 수 있다. 광의 중심파장 $\lambda=1550\text{nm}$ 에서 LiNbO₃의 복굴절률은 $n_o-n_e=0.073$ 이므로 교차지 트랜스듀서의 전극 주기는 $21.2\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다.

위상정합은 편광 비트 길이, L 와 음향파 주기, Δ 가 같을 경우이며, 같지 않을 경우 단위 길이당 $\Delta\phi = -2\pi(\Delta n/\lambda f/v_s)$ 의 위상 부정합이 생기게 된다. 위상 부정합이 생기는 주요 원인은 광도파로의 폭 (width)과 깊이(depth)의 불균일함에 기인되는 유효굴절률 변화, 온도변화, 그리고 기관 재료의 불균일함 때문에 발생된다. 한편 식 (2)의 위상정합 조건은 음향파의 구동주파수 f_0 와 입사광파의 파장을 이용하여 다음과 같은 관계로 나타낼 수 있다.

$$f_0 = \frac{V_s \cdot \Delta n}{\lambda} \quad (4)$$

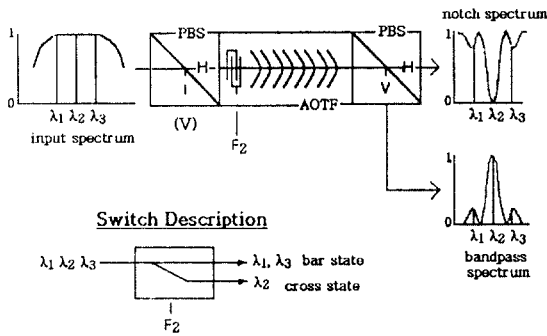


그림 1. 가변파장 필터로 활용하기 위한 구성도

그림 1에서 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 에 해당되는 세 개의 TE 모드가 AOTF에 입사될 경우 λ_2 파장에 대해서 위상정합 조건이 만족될 경우, λ_2 해당되는 TE 모드는 TM 모드로 변환되어서, 출력단에 위치한 PBS에서 λ_2 를 분리시킬 수 있게 된다.

III. 음향광학효과에 의한 TE/TM 모드변환 원리

음향광학효과에 의한 편광모드변환은 아래와 같은 결합방정식을 이용하여 나타낼 수 있으며, 관련식은 다음과 같이 정의된다.^{(8)*}

$$\frac{dR(x)}{dx} = -jk_0 S(x)e^{-j\Delta\beta x} \quad (5-1)$$

$$\frac{dS(x)}{dx} = -jk_0 R(x)e^{j\Delta\beta x} \quad (5-2)$$

R과 S는 TE와 TM의 정규화 복소진폭이며, Δ 는 TE, TM 모드간의 위상 부정합을 나타낸 것이며, 다음과 같이 정의된다.*

$$\Delta\beta \equiv \beta_{TM} - \beta_{TE} - K_{ac} \quad (6)$$

식(6)에서 β_{TE}, β_{TM} 은 TE와 TM 모드의 전파상수이며, K_{ac} 는 표면음향파의 전파상수이다. 여기서 β_{TE}, β_{TM} 의 차와 K_{ac} 가 일치하는 위상정합 조건이 성립한다면 TE, TM 간에 편광모드 변환이 일어나며, 이때 위상정합에 적합한 광파의 파장은 복굴절률과 음향주파수에 의해 결정된다.

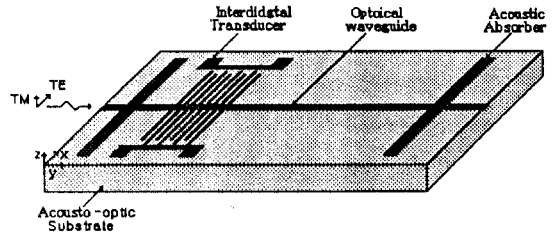


그림 2. 균일한 결합특성을 이용한 AOTF

그림 2와 같은 구조에서, 표면음향파와 이로 인해 나타나는 음향광학효과에 의해서 광도파로를 따라 진행하는 편광모드간에 모드결합이 일어나며, 이때 결합세기의 정도는 결합계수 κ_0 에 의해서 결정되고, 다음과 같이 정의된다.*

$$\kappa_0^2 = \frac{\pi^2}{2\lambda^2} M I_a \Gamma^2 \quad (7)$$

λ 는 광파의 파장, L 는 광도파로를 가로지르는 음향파의 세기, Γ 는 TE와 TM모드와 음향파간의 중복 (overlap) 정도를 나타내는 상수이며, M 은 음향광학효과의 비교지수 (figure of merit)로, 다음과 같이 정의

된다.*

$$M \equiv \frac{(n_{TE}n_{TM})^3 p^2}{\rho V_R^3} \quad (8)$$

n_{TE} , n_{TM} 은 TE, TM 편광모드의 유효굴절률, ρ 는 기판의 매질밀도, V_R 은 음향파의 속도, p 는 광탄성계수(photoelastic coefficient)이며, x, y-cut LiNbO₃ 경우에는 p_{11} 에 해당된다. 그림 3(a)와 같이 결합계수가 균일한 κ_0 일 경우에, 식 (5)에 대한 해는 다음과 같이 유도된다.*

$$\begin{bmatrix} R(x) \\ S(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(x) \dots -jQ(x) \\ -jQ^*(x) \dots P^*(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(0) \\ S(0) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$P(x) = e^{-j\Delta\beta x/2} \left[\cos\left(\frac{x}{2}\sqrt{4x_0^2 + \Delta\beta^2}\right) + \frac{j\Delta\beta}{\sqrt{4x_0^2 + \Delta\beta^2}} \sin\left(\frac{x}{2}\sqrt{4x_0^2 + \Delta\beta^2}\right) \right]$$

$$Q(x) = e^{-j\Delta\beta x/2} \left[\frac{2x_0}{\sqrt{4x_0^2 + \Delta\beta^2}} \sin\left(\frac{x}{2}\sqrt{4x_0^2 + \Delta\beta^2}\right) \right]$$

그림 2에서 입사광파가 TM 모드일 경우($R(0)=0$ 에 해당됨), 결합길이, L_0 에 대한 모드변환효율은 다음과 같이 정의된다.*

$$\xi(x=L_0) = |R(x=L_0)/S(0)|^2 = |Q(x=L_0)|^2 \quad (10)$$

식 (9)로부터 편광모드 변환에 대한 전달함수는 아래와 같은 형태로 유도된다.*

$$\eta(L_0) = \frac{x_0^2 L_0^2}{(x_0^2 L_0^2 + (\Delta\beta/2)^2 L_0^2)} \sin^2 \sqrt{(x_0^2 L_0^2 + (\Delta\beta/2)^2 L_0^2)} \quad (11)$$

위 식에서 $\Delta\beta L_0$ 는 정규화 주파수(normalized frequency)로 정의되며, 일반적으로 식 (3)에서 정의된 3dB 파장대역폭 $\Delta\lambda$ 와는 다음과 같은 관계를 갖으며, 결합길이 L_0 와는 반비례 특성을 나타낸다.*

$$\Delta\beta L_0 = \frac{2\pi\Delta\lambda L_0}{\lambda\Lambda} \quad (12)$$

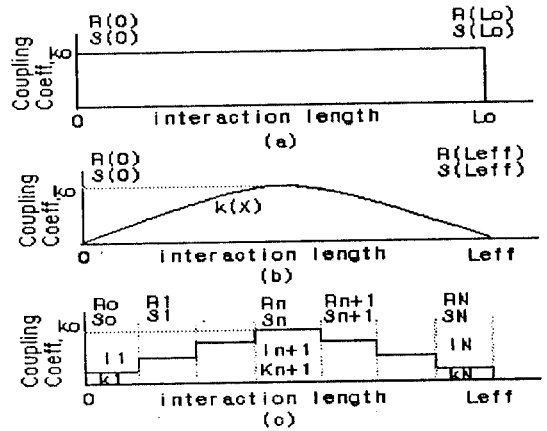


그림 3. 균일결합과 가중결합에 대한 결합계수분포곡

정규화 결합계수, κL_0 를 파라미터로, 그림 4와 같은 균일결합 전달함수를 얻었다. $\kappa L_0 = \pi/2$ 때 부모드의 억압이 가장 양호하였으며, 파장대역 또한 좁게 관찰되었다.

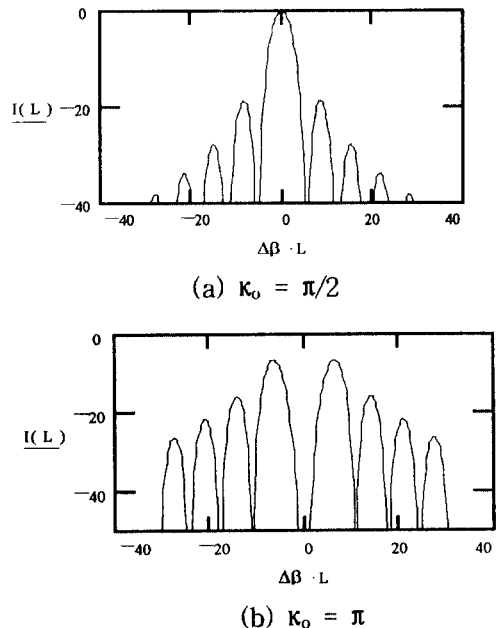


그림 4. 균일결합형 AOIF의 편광모드변환 전달특성 곡선

IV. IDT 전극설계, 제작공정 및 실험결과

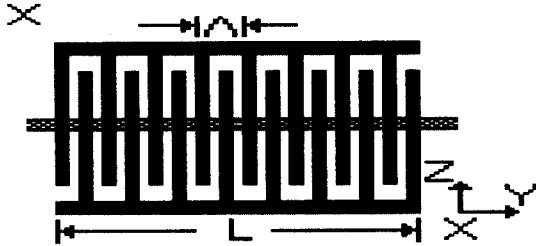


그림 5. 교차지트랜스듀서 전극구조의 레이아웃

표면음향파를 구동시키는데 필요한 그림 5와 같은 교차지트랜스듀서의 설계는 AOTF 제작에 있어서 매우 중요하다. 특히 RF 음향파 신호를 효율적으로 IDT에 전달하기 위해서 임피던스가 50 Ω이 되도록 설계하는 것이 바람직하다. IDT의 컨덕턴스를 계산하는데 이용되는 식은 다음과 같다.^{(9)*}

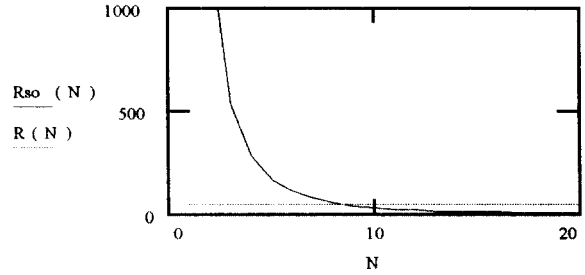
$$G_{so} = \frac{4}{\pi} k^2 \omega^2 C_s N^2 F \quad (13)$$

k 는 유효 전기역학(electromechanical) 결합상수, C_s 는 전극의 한주기에 대한 정전용량, 그리고 N 은 IDT 주기의 총 개수이다. F 는 filling factor를 가리키며, 관계식은 다음과 같다.*

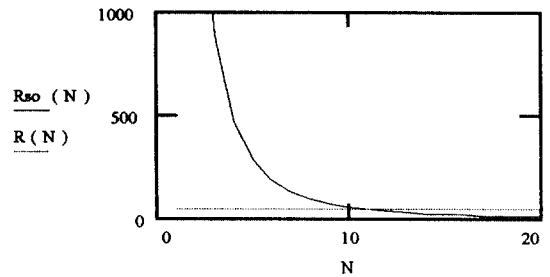
$$K^2 = 2F \left| \Delta \frac{V}{V} \right| \quad (14)$$

$$C_s = (\epsilon_0 + \epsilon_p) W \quad (15)$$

W 는 전극 개구면(aperture)의 폭이며, LiNbO₃ 경우 $\epsilon_p=49 \epsilon_0$, $|\Delta V/V|=0.023$ 이다. 식 (13)~(15)를 이용하여 R_{so} 가 50 Ω이 되도록 W 와 N 을 결정할 수 있으며, 전극 개구면, W 와 주기의 총개수, N 에 따른 저항값 변화를 그림 6과 그림 7에 나타내었다. IDT 설계에 있어 finger의 간격은 $\lambda/4$ 이며, 일반적으로 동일한 간격을 유지한다.

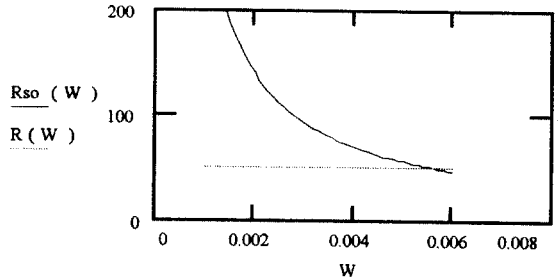


(a) W=3mm

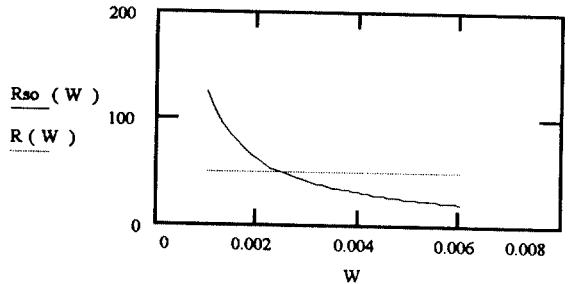


(b) W=5mm

그림 6. 전극의 개구면, W 를 파라미터로 교차전극개수, N 에 따른 임피던스의 변화 점선은 50 Ω을 나타냄



(a) N=10



(b) N=15

그림 7. 교차지 전극의 finger 개수를 파라미터로, 개구면 W 에 따른 임피던스의 변화 점선은 50 Ω을 나타냄

AOTF의 제작공정을 단계별로 요약하면 다음과 같다. x-cut LiNbO₃ 위에 e-beam 증착기로 증착된 1300 두께의 Ti을 사진식각공정으로 8, 9 m 폭의 채널 패턴을 형성한 다음, 1050°C 온도에서 8시간 동안 확산하여 1.55 m 파장대역에서 단일모드로 동작하는 채널 광도파로를 제작하였다.(10) 고온의 확산과정에서 Li 원소의 out-diffusion 현상때문에 나타나는 평면형 기생도파로를 억제하기 위해서 40-50°C wet-O₂ 분위기에서 확산을 수행하였다. 광도파로에 광파를 효율적으로 입사시키기 위해서 입사단면을 optical grade 수준으로 연마하였다. 이 단계에서 end-fire 결합시스템과 광섬유를 이용한 Butt 결합 시스템을 활용하여 광도파로의 전파손실과 삽입손실을 측정하고, 모드분포를 검토하였다. LiNbO₃의 음향광학효과를 이용하기 위해서, 채널 광도파로위에 SAW를 발생시키는 IDT 전극구조를 진공증착기로 증착시킨 2000 Å Al로 제작하였다. 다양한 실험 결과를 얻기 위해서 IDT의 주기 개수 N=10, 20, 50, 100, 개구면 W=120 μm, 5mm로 다양하게 제작하였다. 그림 8은 최종적으로 제작된 AOTF 소자의 사진이다.

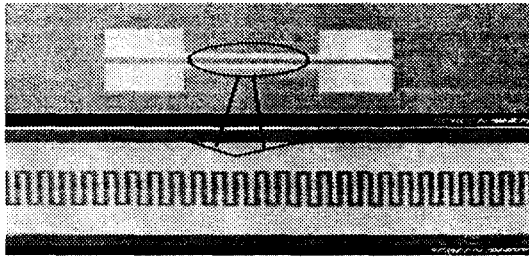


그림 8. 최종적으로 제작된 AOTF의 사진

End-fire 결합시스템의 입출력단에 편광모드 분리기(PBS)를 배치하여 그림 9와 같은 측정시스템을 구성하였다. 1.33 m 파장의 광원을 이용하여 TE-TM 모드변환을 측정하였다. 일반적으로 출력단에서 표면탄성파가 반사될 경우 부모드가 비교적 크게 생성되어 필터 특성을 저하시키기 때문에 표면탄성파의 반사를 억제하기 위해서 입출력면 전후에 scotch tape를 이용하여 absorber를 형성하였다. 그림 10은 IDT의 주기 개수 N=50, 개구면(aperture) W=120 μm, 길이

L=22mm로 제작된 AOTF의 모드변환을 나타낸 것이다. SAW의 중심주파수 210MHz, 구동전력 366mW에서 약 16.5dB 정도로 TE 모드가 TM 모드로 변환되었으며, 247MHz 부근에서 6dB 정도의 부모드가 측정되었다. 따라서 부모드는 주모드와 비교해서 10dB 정도로 억압되었다. 실험적으로 측정된 210MHz 중심주파수는 식 (4)를 이용하여 계산된 214MHz와 비교해서 나타나는 오차는 IDT 전극 제작시 이론적으로 계산된 주기 21.2μm가 정확하게 형성되지 않은 것으로 추정된다. 그림 11은 N=10, W=4.8mm, L=22mm인 IDT 전극으로 제작된 AOTF의 변환효율을 나타낸 것으로, 215MHz 부근에서 약 12dB 정도의 변환이 측정되었다. 그림 10과 그림 11을 비교할 경우, 주기개수, N가 많을수록 변환효율이 최고되는 주파수영역에서 공진폭이 좁아짐을 알 수 있다. 한편 부모드 발생은

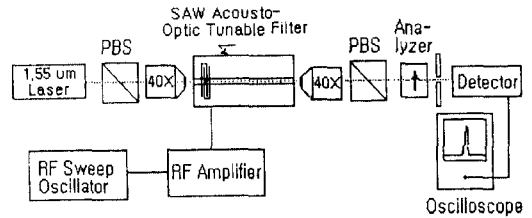


그림 9. End-fire와 편광모드분리기를 이용한 편광모드 변환 측정시스템

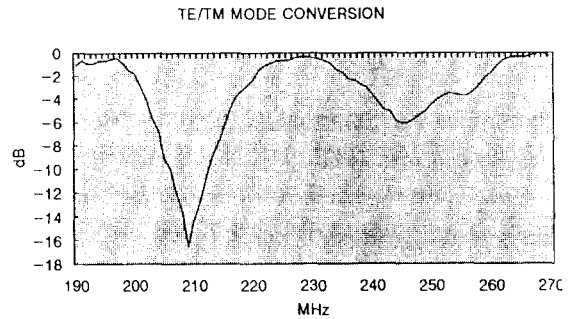


그림 10. TE 입사모드에 대해서 출력단에서의 TE→TM 모드변환: IDT 전극제원: N=50, W=120μm, L=22mm

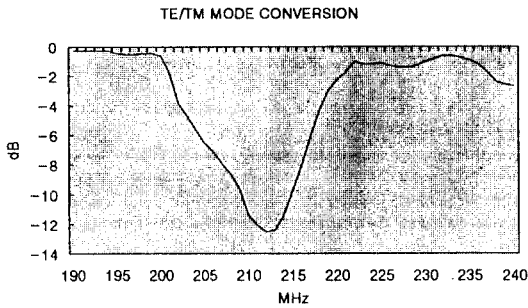


그림 11. TE 입사모드에 대해서 출력단에서의 TE→TM 모드 변환: IDT 전극제원: N=10, W=4.8mm, L=22mm

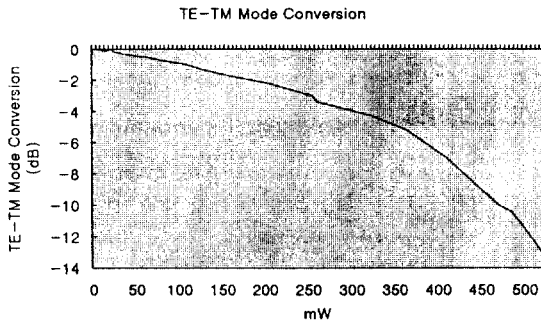


그림 12. RF 구동전력에 따른 TE→TM 모드변환

표 1. 파장을 가변시키는 원리에 따른 가변파장 여파기들의 상호장단점 비교

Device Types	Tuning Mechanisms				
	Thermooptic 1ms	Piezoelectric 0.1ms	Acoustooptic 10μs	Free Carrier 1ns	Electrooptic 10ps
Fabry Perot		가변속도가 낮다.			
Phase-Matching			• 편광결합 이용 • 파장가변 범위가 넓다 • Resolution 이 좋다		• 편광결합 이용 • 파장가변 범위가 좁다 • 선택폭이 좋지 않다.
Bragg Grating				• 파장가변 범위가 매우 좁다	
Mach-Zehnder	파장가변 속도가 낮다	파장가변 속도가 낮다			

주기 개수가 적을수록 부모드의 크기가 작아지는 것을 실험적으로 확인할 수 있다. 따라서 주기개수를

결정할 때는 부모드와 공진대역폭간에 적절한 고려를 해야된다. 그림 12는 중심주파수 210MHz에서 구동전력에 따른 모드변환 정도를 dB로 나타낸 것이다. 예상한대로 구동전력이 증가할수록 모드변환 효율이 증가됨을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 음향광학효과를 이용한 편광모드 변환형 가변파장 광필터에 관해서 동작원리, 부모드억압, 교차지트렌스듀서 전극구조 설계, 제작공정등을 중심으로 연구하였다. 결합방정식을 이용하여 편광모드변환에 관한 수식적 배경을 검토하였다. IDT 전극의 개구면 폭과 finger 개수가 임피던스에 미치는 영향을 정량적으로 검토하였으며, RF 신호를 효율적으로 IDT 전극에 전달하기 위해서 임피던스가 50Ω 이 되도록 설계하였다. x-cut LiNbO₃에 Ti를 확산하여 제작된 채널광도파로와 IDT 전극으로 AOTF를 제작하였다. IDT의 주기개수 N=50, 개구면(aperture) W=120 μm, 길이 L=22mm로 제작된 AOTF 경우, SAW의 중심주파수 210MHz, 구동전력 366mW에서 약 16.5dB 정도로 TE 모드가 TM 모드로 변환되었으며, 247MHz 부근에서 6dB 정도의 sidelobe가 측정되었다. 한편 N=10, W=4.8mm, L=22mm인 IDT 전극으로 제작된 AOTF 경우에는, 215MHz 부근에서 약 12dB 정도의 변환이 측정되었다. 본 연구에서 제작된 소자는 특정파장에 대해서 특정 주파수를 갖는 SAW를 인가할 경우, 그 중심주파수에서 모드가 변환되어 편광분리기를 통해서 모드를 분리할 수 있는 편광모드 변환형 파장가변 광여파기로 동작됨을 확인하였다.

참고 문헌

1. Amaury Jourdan, et al, " Design and Implementation of a Fully Reconfigurable All-Optical Crossconnect for High Capacity Multiwavelength Transport Networks," J. Lightwave Technol., Vol. 14, No. 6, pp. 1198-1206, June 1996.
2. Janet L. Jackel, " Acousto-Optic Tunable

- Filters(AOTF's) for Multiwavelength Optical Cross-Connects: Crosstalk Considerations," J. Lightwave Technol., Vol. 14, No. 6, pp. 1056-1066, June 1996.
3. Charles A. Brackett, et al, "A Scalable Multiwavelength Multihop Optical Network: A Proposal for Research on All-Optical Networks," J. Lightwave Technol., Vol. 11, No. 5, pp. 736-753, May 1996.
 4. 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.
 5. 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.
 6. J. Frangen, et al, "Integrated Optical, Acoustically Tunable Wavelength Filter," Electron. Lett., 9th Nov. 1989, Vol. 25, No. 23.
 7. David A. Smith, Jane E. Baran, John J. Johnson, and Kwok-Wai Cheung, "Integrated-Optic Acoustically-Tunable Filters for WDM Networks, IEEE Journal on selected areas in communications. Vol. 8. No. Aug. 1990.
 8. Arjun Kar-Roy, and Chen S. Tsai, "Integrated Acoustooptic Tunable Filters Using Weighted Coupling", IEEE J. Quantum Electronics, Vol. 30, No. 7, July 1994.
 9. G.S. Kino, "Acoustic waves' devices, imaging and analog signal processing", Prentice-Hall, Inc., 1987.
 10. 박석봉, 정홍식, "LiNbO3의 스트레인광학 효과를 이용한 모드변환형 광여파기 제작에 관한 연구," 전자공학회논문지, 제 35권, D-1, pp.72-78, Jan. 1998.



송 석 호(Suk Ho Song) 학생회원
1974년 4월 14일생
1997년 2월:홍익대학교 전자전산
공학과(학사)
1997년 3월~현재:동대학원 전자
전산공학과 석사과정
※주관심분야:광집적소자(광스위치, 광여파기), 광
통신시스템.



정 홍 식(Hong Sik Jung) 정회원
1959년 6월 25일생
1982년 2월:서강대학교 전자공학
과(학사)
1984년 8월:서강대학교 대학원
전자공학과(석사)
1989년 5월:미국 Texas A&M 대학
전기공학과(공학박사)
1989년 3월-1990년 2월: 일본 신기술사업단(JRDC),
연구원
1990년 3월-현재:홍익대학교, 전자전기컴퓨터공학부,
부교수
※주관심분야:광집적소자(광변조기, 광스위치, 광여
파기), 광통신시스템