

광통신용 도파로형 Ti:LiNbO₃ AOTF 제작 및 특성

11-8-9

Characteristics and Fabrication of a Waveguide Type Ti:LiNbO₃ AOTF(Acousto-Optic Tunable Filter) for Optical Communications

김성구*, 한상필*, 윤형도*, 임영민*, 윤대원*, 정운조**, 박계춘**, 정해덕***,
(Sung-Ku Kim, Sang-Pill Han, Hyung-Do Yoon, Young-Min Im, Dae-Won Yoon, Woon-Jo Jung, Gye-Choon Park, Hae-Duk Jung)

Abstract

The characteristics of waveguide, electrode and packaging fabricated for acousto-optic tunable filters(AOTF) used for optical communications were analyzed. A Ti:LiNbO₃ in-diffusion method was employed for the formation of the optical waveguide with a dimension of width 8 μ m, length 30000-50000 μ m and varying the thickness. The diffusion was carried at 1050 $^{\circ}$ C for 8 hours to pattern the optical waveguide. The resulted waveguide exhibited a single mode at 1550nm optical wavelength. The width of IDT, with 10 SAW periods, was 5000 μ m. Impedances of the electrodes deposited with Au were analyzed using a network analyzer; 48.1 Ω at the center frequency of 193MHz for electrode thickness of 1500 Å and 50.7 Ω at the center frequency of 192MHz for 1600 Å . And the characteristics of packaged AOTF was analyzed. When the electrical frequency 177.1MHz was applied to the device, the mode conversion efficiency was measured as 63% at the optical wavelength 1515nm.

Key Words(중요용어) : AOTF(음향광학필터), Ti:LiNbO₃(티타늄산화 광도파로), Center frequency(중심 주파수), Characteristic impedance(특성임피던스)

1. 서 론

디지털 및 광전송 시스템 등장으로 보다 다양한 서비스 제공이 가능한 유연한 통신망을 지니게 되었으며 통신서비스에 대한 가입자 요구가 디지털화, 고속화, 광대역화 그리고 개인화를 향하여 이를 수용할 수 있는 통신망으로 각사업자는 광통신망 구축을 서두르고 있으며¹⁾ 이에 소요되는 다량의 광부품이 요구되고 있다.

전송속도 10Gbps급 이상 WDM(wavelength division multiplexing) 기술요소에서 광필터는 광변

조기, 광스위치, 광아이솔레이터, 광커플러 등의 다른 수동 및 능동광부품과 함께 핵심부품중의 하나이다²⁾.

광필터 분류는 도파로 형태를 갖는 AOTF³⁾와 EOTF(electro-optic tunable filter)⁴⁾가 있으며, 광섭유 형태의 FPF (Fabry-Perot filter)⁵⁾로 분류될

표 1. 다양한 광필터 비교.

Table 1. Comparisons of optical filters.

Technology	FPF	AOTF	EOTF
튜닝범위(nm)	50	400	10
대역폭(nm)	<0.01	1	1
채널 수	100	100	10
튜닝속도	ms	μ s	ns

* : 전자부품종합기술연구소 통신부품연구센터
(경기도 평택시 진위면 마산리 455-6, Fax: 0333-610-4126
E-mail : kimking@iccnet.co.kr)
** : 한려대학교 전기공학과
*** : 목포대학교 전기공학과
1997년 12월 30일 접수, 1998년 5월 14일 심사완료

수 있다. 표1에 tuning 범위 및 tuning 속도 등을 나타내었다⁶⁾.

본 연구에서는 WDM 광통신 시스템에 사용되는 Ti:LiNbO₃ 도파로형 음향광학 가변 광필터(AOTF, electro-optic tunable filter)의 기본적인 구조를 설계 및 제작하여 파장1.55 μ m에서 Ti:LiNbO₃ 채널형 도파로의 도파특성 및 AOTF 시제품 특성을 연구하였다.

2. 제작 및 측정

광도파로 제작을 위한 공정은 그림 2와 같은 공정 조건으로 LiNbO₃ 기판 위에 티타늄 박막을 증착하고 패터닝하여 확산으로 제작한다.

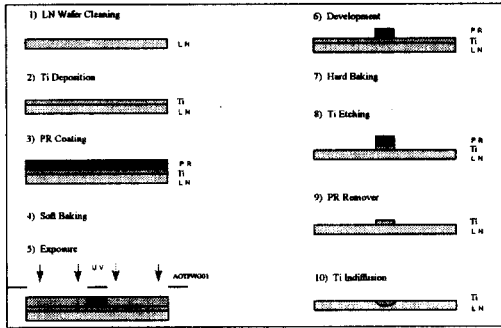


그림 2. 도파로 공정도.

Fig. 2. Process diagram of waveguide.

도파로 패턴이 형성된 시편은 튜브 확산로에 장착하고 확산 작업을 수행하는데, 확산 온도는 1050 $^{\circ}$ C 이고 확산 시간은 8 시간이며 Li₂O out-diffusion을 억제하기 위해 wet O₂ 분위기를 사용하였다. SAW(surface acoustic wave) IDT(inter digital transducer) 공정도는 그림 3에 나타내었다. LiNbO₃ 기판과 Au에 부착력을 향상시키기 위하여 기저금속인 NiCr/Au를 E-beam 증착으로 500-1000/500-1000Å을 증착시켰다.

그림 4 전극개구면의 폭, W=0.1mm, N=20로 제작된 전극사진이다.

그림 5는 제작한 패키지에 도파로 내부칩을 장착하고 SMA connector 및 Ag-paste를 사용하여 SAW IDT 전극에 본딩한 예를 보이고 있다. 일반적으로 본딩은 Au 선이나 Al 선으로 본딩하지만

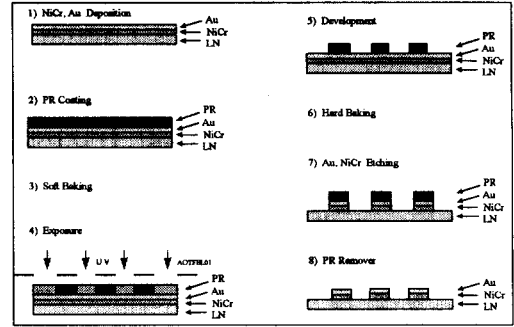


그림 3. 전극 공정도.

Fig. 3. Process diagram of electrode.

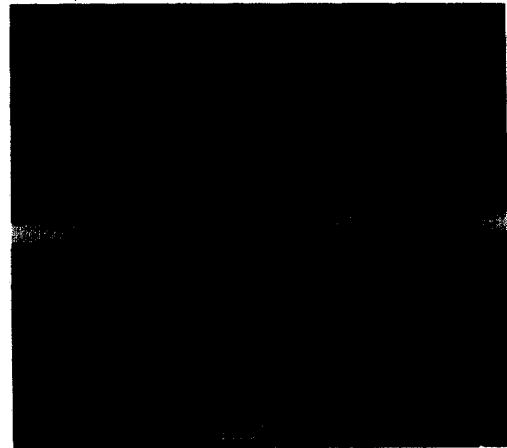


Fig. 4. Electrode of SAW IDT(W=0.1mm, N=20, 4 $^{\circ}$).

그림 4. SAW IDT 전극(W=0.1mm, N=20, 4 $^{\circ}$).

반복 실험을 위해서 페이스트를 사용하였다. 그림 5의 윗쪽은 반대로 진행되는 SAW를 흡수하기 위해서 바른 흡수제(absorber)이다. 이 흡수제는 순수 고무나 포토리지스트등을 사용하여 수작업으로 바른다. 패키지는 알루미늄을 가공하여 제작하고 전체 표면을 니켈크롬으로 얇게 도금한다음 다시 Au를 10-20 μ m 정도 두께로 도금하였다.

그림 6은 전극 바로 밑을 지나는 도파로 양단에 광파이버를 피그테일링하기 위한 개략도와 실제 예를 보였다. 기판위에 유리를 덧붙혀 폴리싱하고, FC(fiber connector)용 패물에 광파이버를 끼우고

폴리싱하여 준비한 PM(polarization maintaining) 파이버로 그림과 같이 피그테일링하였다. 그림 7에 이와같은 방법으로 제작 완료된 AOTF 샘플사진을 나타내었다. 그림 8에 AOTF 동작특성을 실험하기 위한 개략도를 나타내었다.



그림 5. 전극 본딩
Fig. 5. Electrode bonding

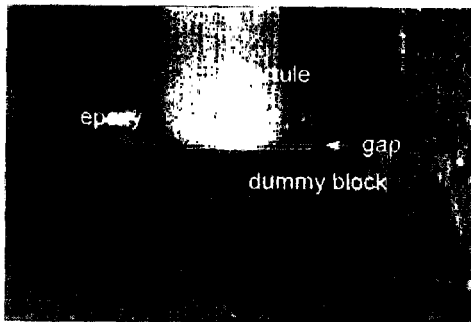


그림 6. 파이버 피그테일링.
Fig. 6. Fiber pigtailling.



그림 7. 패키징.
Fig. 7. Packaging.

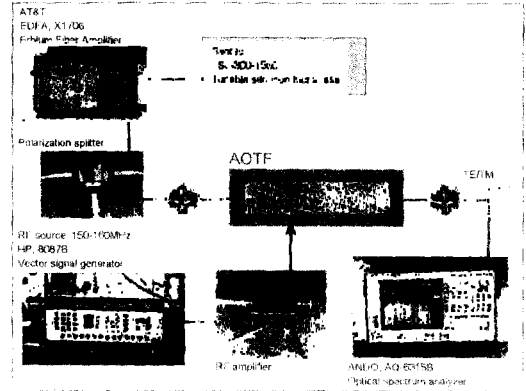


그림 8. Tuning 특성측정
Fig. 8. Measurements of Tuning characteristics

3. 결과 및 고찰

X-cut LiNbO₃에 제작한 광도파로 w는 확산 전의 Ti strip의 폭을, τ는 두께를 가리킬 때 Ti가 확산된 후에 형성된 Ti:LiNbO₃ 광도파로의 굴절률 분포는 다음과 같이 모델링할 수 있다^{2, 9)}.

$$n(x, z) = n_s + \Delta n \cdot f(x) \cdot g(z) \quad (1)$$

n_s는 기판의 굴절률이고, Δn, f(x) 및 g(z)는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta n(\tau, w) = \frac{dn}{dc} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\tau}{dx} \operatorname{erf} \left(\frac{w}{2dz} \right) \quad (2)$$

$$f(x) = \exp \left\{ - \left(\frac{x}{dx} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

$$g(z) = \left\{ \operatorname{erf} \left(\frac{z+w/2}{dz} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{z-w/2}{dz} \right) \right\} / 2 \operatorname{erf} \left(\frac{w}{2dz} \right) \quad (4)$$

여기서, dn/dc는 Ti concentration에 대한 굴절률 변화량, dx는 확산 깊이, dz는 확산 길이를 나타내며, dx 및 dz는 다시

$$d_{x,z} = 2\sqrt{D_{x,z} \cdot t} \quad (5)$$

이며 $D_{x,z}$ 는 x 및 z 방향으로의 확산 계수, t 는 확산 시간을 가리킨다. 식 (1)~(5)를 이용하여 $b-v$ (정규화결절분포) 분산곡선을 그려서 단일 모드의 최적치를 구할 수 있다.

1550nm 광파에 대하여 광도파로의 단일 모드 도파 특성을 확인하기 위해서 출력 광의 near field 패턴을 관찰하였다. 도파로의 출력 파워 및 near field 패턴을 측정하기 위한 도파 실험 set 구성은 광원인 가변파장레이저(tunable laser source)와 He-Ne 레이저가 2x1 커플러를 통하여 광도파로에 동시에 입사할 수 있게 구성하였고 출력 단에는 광전력계(power meter) 및 CCD(charge coupled device) 적외선 카메라를 정렬하여 출력 광파를 관찰할 수 있게 하였다.

광도파로 폭은 $8\mu\text{m}$ 그리고 길이를 $30000\mu\text{m}$ 로 하고 두께를 변화시키면서 제작한 Ti 도파로 패턴을 확산 온도 1050°C , 확산 시간 8시간 동안 확산으로 제작된 광도파로의 삽입손실 및 모드 크기와 CCD IR 카메라를 이용하여 검출한 near field pattern을 아래에서 논의하였다.

두께에 따른 도파 특성을 자세히 조사하기 위해서 그림 9는 Ti 두께별로 제작한 시편의 모드크기를 나타낸 것이다. 근거리 모드 패턴은 먼저 입력측을 PMF로 피그테일링시킨 다음 도파로 출력단에서 도파 모드를 관찰하였다. 증착두께가 800Å 보다도 적을때는 TM 및 TE 모드 크기가 모두 $15\mu\text{m}$ 이상으로 나타난 반면에 800Å 이상에서부터 모드크기가 감소하기 시작하여 약 1400Å 까지 그 크기가 최소로 감소하였다. 그리고 1500Å 에서도 모드 크기는 1400Å 정도로 작으나, 이 두께는 파장 1550nm 레이저 광원에 대하여 멀티모드 특성이 나타나는 관계로 논의 대상에서 제외하였다. 본 연구에서 가장 작은 모드 크기는 Ti 두께 $1200\text{--}1300\text{Å}$ 분포에서 측정되었고, 이때 모든 조건들이 양호하게 측정되었다. 이 두께에서 TM 모드 횡/종 모드 크기는 약 $14\mu\text{m}/8\text{--}10\mu\text{m}$, TE 횡/종 모드는 $9\text{--}10/5\text{--}7\mu\text{m}$ 범위에서 관측되었다. 시편 전체를 걸쳐서 TE 모드 크기가 TM 모드 크기보다도 작게 나타났다. 실험 측정시 오차가 존재하지만 두께 1400Å 을 초과하면서 부터는 각각 모드 크기가 대체로 증가하는 경향을 나타내었으나 확실한 증거를 얻기 위해서는 실험이 병행되어야 할 것 같다.

그림 10은 제작한 샘플을 선별하여 도파로 입력단자에 PMF를 피그테일링하고 출력단자에도 PMF를 피그테일링한 후 패키징하여 Fiber-to-fiber 삽입손실을 측정한 실험결과이다. 시편두께 약 1180Å 근처부터 모드 삽입 손실 반전이 발생한다. 즉, 그 이하 두께에서는 TE모드가 4dB 이내 존재하지만 그 이상 두께에서는 반대로 TM 모드가 4dB 이내에 존재하는 기이한 현상이 관측되었다. 더욱이 두께를 1400Å 이상 증가시키면 삽입손실이 더욱 감소하는 경향을 보였다. 그러나 본 연구에서는 더 이상 Ti 두께를 증대시키지 않았다. 그 이유는 AOTF에 응용하기 위해서는 TE 및 TM 모드를 모두 사용하기 때문에 양 모드를 모두 만족시키는 Ti 두께가 요구되었으므로 본 연구에서 요구되는 최적 Ti 증착두께는 $1150\text{--}1200\text{Å}$ 사이에 존재하는 것으로 결론을 내렸다. 그림 14에는 증착 두께 $1150\text{--}1200\text{Å}$ 근처 두 개 시편의 근거리 패턴 및 모드 크기를 데이터로 제시하였다.

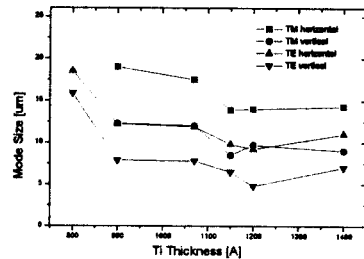


그림 9. 모드크기.
Fig. 9. Mode size.

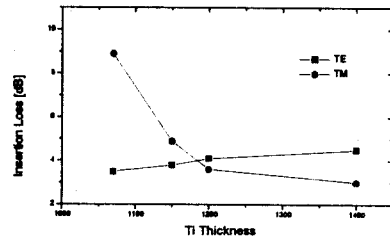


그림 10. Fiber-to-fiber 삽입손실.
Fig. 10. Fiber-to-fiber insertion loss.

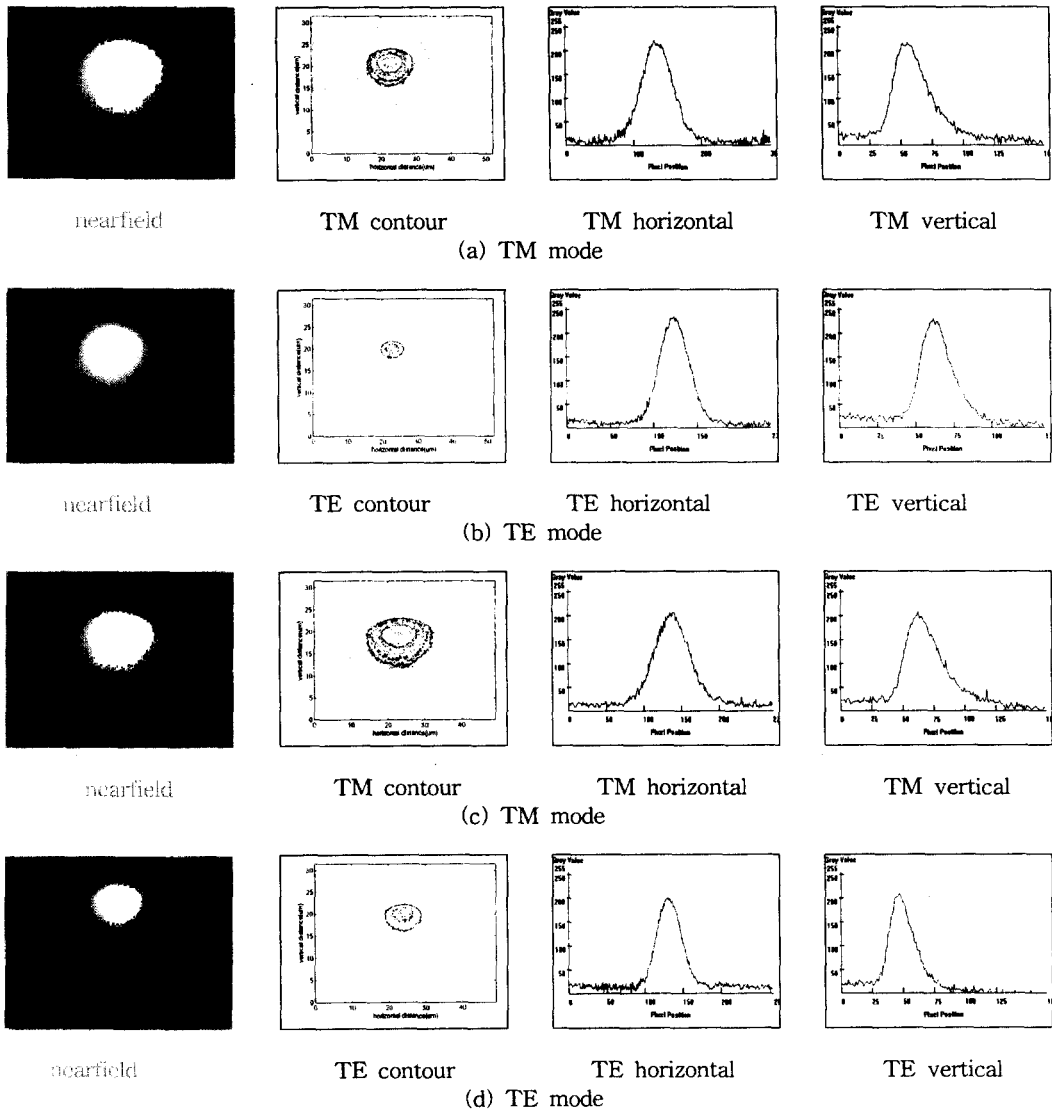


그림 14. 근거리패턴. (a), (b) Ti thickness 1150Å, (c), (d) 1210Å

Fig. 14. Near-field pattern. (a), (b) Ti thickness of 1150Å, (c), (d) of 1210Å

전극을 형성하는 SAW IDT의 위상 정합을 위한 관계식은 식 (6), (7)과 같이 된다.

$$f_s = \frac{v_s}{\Lambda_s} \quad (7)$$

$$\Lambda_s = \frac{\lambda_o}{(n_o - n_e)} \quad (6)$$

여기서 Λ_s 는 SAW 주기, λ_o 는 광 중심 파장, $(n_o - n_e)$ 는 LiNbO₃의 복굴절률, f_s 는 SAW 중심주파수, v_s 는 SAW 위상속도를 의미한다. 광 중심파장

$\lambda_0=1550\text{nm}$ 에서 LiNbO₃의 복굴절률은 $n_o-n_e=0.073$ 이므로 $\Lambda_s = 21.2\mu\text{m}$ 임을 얻을 수 있다. SAW 위상속도 v_s 는 Y-cut인 경우 위상속도(phase velocity, 탄성파속도)는 3488m/s이고¹¹⁾, X-cut LiNbO₃ 재질 기판에 대해서 3600~3800m/s 이므로 f_s 는 170~179MHz로 계산되었다.

SAW IDT의 임피던스 정합 조건식은 다음과 같다⁷⁾.

$$G_{a0} = \frac{4}{\pi} K^2 \omega_0 C_s N^2 F \quad (8)$$

G_{a0} 는 중심주파수 동조에 대한 컨덕턴스를 나타내며, 이것을 이용하여 동조 임피던스를 계산하여 정합 조건을 이루는 설계치를 구할 수 있다. 또한, K 는 effective electromechanical 결합상수, C_s 는 전극의 한 주기에 대한 정전용량, N 은 주기의 총 개수이고, F 는 filling factor를 가리키며, 관계식은 다음과 같다.

$$K^2 = 2F \left| \frac{\Delta v_s}{v_s} \right| \quad (9)$$

$$C_s = (\epsilon_0 + \epsilon_p)W \quad (10)$$

F 는 전극의 strip과 gap이 서로 같은 경우에는 1.12로 놓으며, LiNbO₃의 경우에 대해서는 $|\Delta v_s/v_s|=0.023$ 이다. 그리고 ϵ_p 는 LiNbO₃의 경우 $49\epsilon_0$ 로 주어진다. 본 연구에서는 식(6), (7)을 이용하여 $\Lambda_s/4=5\mu\text{m}$ 로 택하였으며, 식(8)~(10)을 이용하여 $R_{a0}=50\Omega$ 을 만족하는 전극개구면의 폭 $W=5\text{mm}$, SAW 주기의 총갯수 $N=10$ 으로 설계하였다.

제작된 전극의 특성을 알아보기 위해서 소자단 위의 크기로 절단하여 전극측정용 패키지안에 부착시켰다. 전극의 급전패드부분과 패키지의 SMA 컨넥터 사이를 wire bonding하여 부착시켰다. 회로 망분석기를 이용하여 제작된 표본전극의 S₁₁ 반사특성과 Smith chart로 본 임피던스 특성을 관찰하였다.

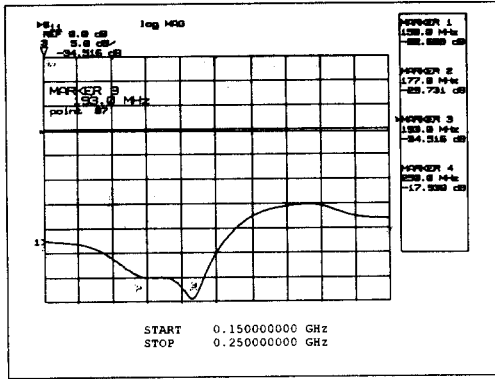
그림 15는 W(전극개구면의 폭)=5mm, N(SAW 주기의 총갯수)=10, T(전극의 두께)=1500Å로 제작된 표본의 전극특성으로 중심주파수 193MHz에서 48.1Ω을 만족하였으며, 그림 16은 W=5mm, N=10, T=1600Å로 제작된 표본의 전극특성으로 중심주파

수 192MHz에서 50.7Ω을 만족하였다.

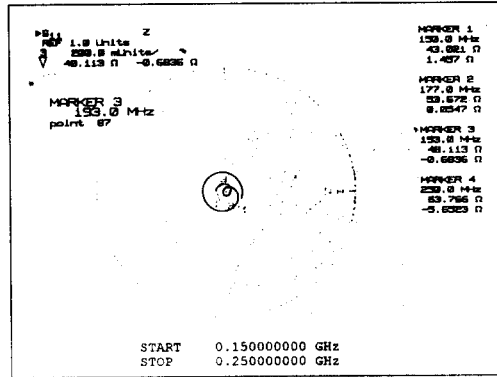
그림 15와 16을 비교해 보면 S₁₁ 반사특성 및 임피던스 정합 측면에서는 그림 15보다 그림 16이 우수함을 알 수 있다. 그 이유는 전극두께의 증가로 인해서 SAW IDT 전극 strip의 총정전용량 C_T(=NC_s)가 영향을 받아 변화하여 SAW IDT 전극 동가회로 부하어드미턴스 증대를 일으킨 것으로 보인다. 즉 부하어드미턴스는 IDT와 RF 인가 영역인 전극패드부분을 제외한 오직 SAW 발생에만 기여하는 어드미턴스와 IDT에 존재하는 총정전용량의 합으로 표현되기 때문이다¹⁰⁾. 이로 인하여 전극의 임피던스가 변화하여 T=1600Å에서 비교적 좋은 특성을 얻을 수 있는 것으로 분석되었다.

그림 17에는 전극 두께에 따른 중심 주파수 변화와 임피던스 변화를 나타내었으며, 이것은 임피던스가 50Ω으로 설계된 중심주파수와 측정된 결과 상호간에 다소 차이가 있었다. 결과적으로 전극 두께의 가변은 SAW의 위상속도를 가변시키기 때문에 중심 주파수를 변화시킬 수 있어 중심 주파수 및 특성임피던스 변화로 설계 조건을 맞출 수 있었다. 그림16과 그림17을 종합해볼 때, 전극의 두께가 약 1600Å에서 최적의 임피던스 정합을 만족함을 알 수 있으며, 이때의 중심 주파수가 192MHz, 위상속도가 3840m/s임을 알 수 있다.

그림 18은 제작한 소자 인가주파수와 광필터링 특성을 나타내고 있다. 당초 설계한 소자 중심 주파수는 174MHz 정도이지만 실제 제작하고 광필터링 특성을 측정한 결과 중심 주파수는 180MHz 이상 더 높은 영역에 존재하는 것으로 판단되었고, 측정 주파수는 중심 주파수를 벗어나 사이드로브(sidelobe) 영역의 한점으로 생각되는 파장 177.1MHz에서 광파장 1515nm를 필터링하는 것을 확인하였다. 이때 변환 효율(mode conversion efficiency)은 약 63%로서 이득은 -2dB였다. 그러나 중심 주파수에서 동작특성이 아닌 점이나 광스펙트럼 측정기의 측정한계가 1500nm인 점을 고려해보면 주파수를 177.1MHz 이상대역에서 소자특성은 중심 주파수부근 효율은 이값 보다는도 크게 개선될 것으로 사료된다. 결과적으로 제작한 전극의 중심 주파수가 177MHz 보다는 크게 되어 이론값과 상당한 불일치를 보았으며 이에 대한 설계 개선점이 요구되었다. 본 연구에서는 반복 제작 실험을 통하여 얻은 데이터를 기본으로 모의실험을 수정하고 소자 설계상의 탄력성을 부

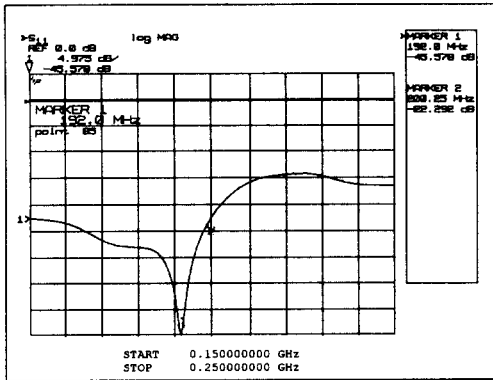


(a) S_{11} 반사

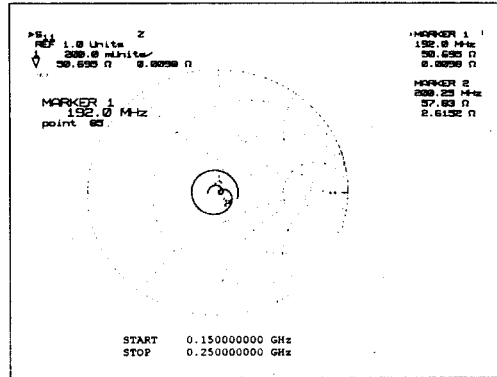


(b) 스미스 차트

그림 15. 전극특성 ($W=5\text{mm}, N=10, T=1500\text{Å}$)
Fig. 15. Electrode properties.



(a) S_{11} 반사특성



(b) 임피던스 특성

그림 16. 전극 특성 ($W=5\text{mm}, N=10, T=1600\text{Å}$)
Fig. 16. Electrode properties

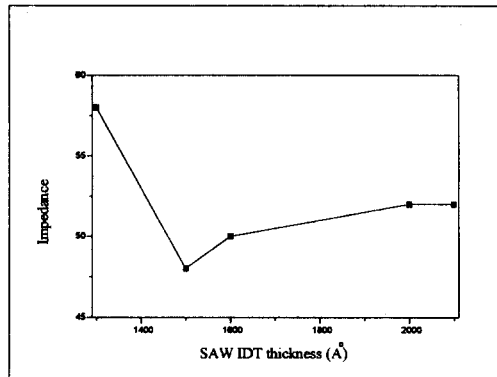
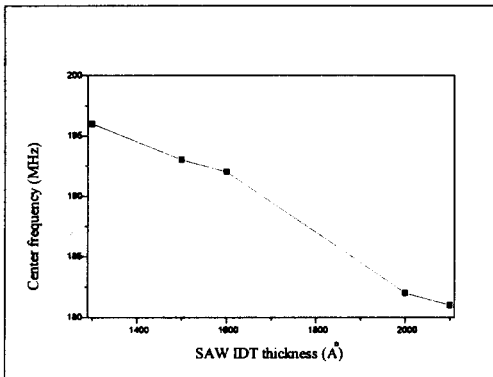


그림 17. 전극 두께에 따른 중심 주파수의 변화 및 임피던스 변화
Fig. 17. Transitions of center frequency and impedance as a function of electrode thickness.

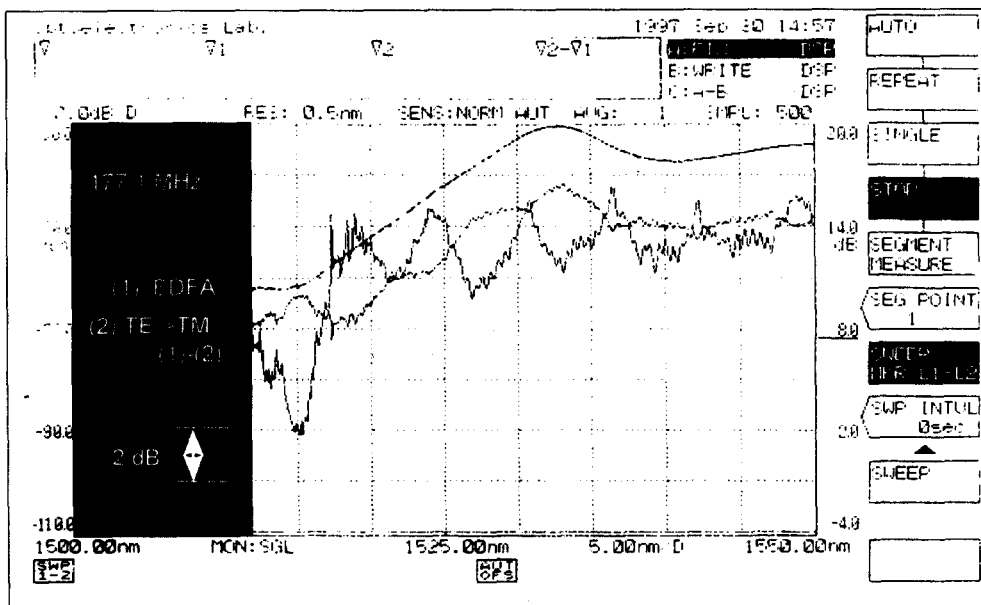


그림 18. 필터 특성
Fig. 18. Characteristic of filtering

여할 수 있는 설계모형을 구축하고자 하였다.

4. 결 론

본 연구를 통하여 광필터 제작에 필수적인 광도파로 제작법과 전극설계방법 및 광소자 패키징방법에 관하여 관련기술을 개발하였다. 여기서 논의된 결과를 간략히 요약하면 다음과 같다.

- ① AOTF를 제작하기 위한 광도파로 및 SAW IDT 전극공정 최적조건을 조사하였다.
- ② Ti:LiNbO₃ 내부확산방식 광도파로의 1550nm ±30nm대에서 단일모드 조건을 만족하는 광도파로 조건에 관해 논의하였다.
- ③ SAW IDT는 전극개구면의 폭을 5000 μ m, SAW주기를 20 μ m, SAW주기의 갯수를 10개로 하였을 때 임피던스 정합을 이루었으나 실제 제작된 소자와는 상당한 오차를 수반하였고 보완이 요구되었다.
- ④ 전극의 S11 반사특성 및 임피던스를 분석한 결과 Au 두께가 1500Å으로 증착된 표본은 중심 주파수 193MHz에서 48.1 Ω , 1600Å으

로 증착된 표본은 중심주파수 192MHz에서 50.7 Ω 을 나타내었다.

- ⑤ 광필터링을 나타낸 파장은 177.1MHz로서 이때 변환효율은 63%이고 TE->TM 변환마진이 -2dB 였다.

참 고 문 헌

1. 한국전자통신연구소, "광통신의 전개", 94-03.
2. 전자부품종합기술연구소, "광통신용 도파로형 광필터개발에 관한연구", KETI-RD-97076
3. J. Frangen, H. Herrmann, R. Ricken, H. Seibert, W. Sohler, and E.Strake, "Integrated optical acoustically tunable wavelenth filter", Electron. Lett., Vol. 25, No. 23, pp.1583-1584, Nov. 1989.
4. W. Warzansky, F. Heismann, and R.C. Alferness, "polarization-independent electro optically tunable narrow-band wavelenth filter", Appl. Phys. Lett. Vol. 53, No. 1, pp.13-15, Jul. 1988.
5. Y. Suemura and Naoya Henmi, "A newly developed adaptive wavelenth tunable filter

- for wavelength selective optical communication systems", ECOE '93 proceeding, Vol. 2, pp. 433-436, 1993.
6. Pankaj K. Das, Casimer M. Decusatis, "Acousto-optic signal processing: fundamentals & applications", Artech House.
 7. J. J. Jhonson and D. A. Smith, "Polarization converter with apodized acoustic waveguide", U.S patent 5,218,653, Jun. 1993
 8. 일본학술진흥회, 彈性波素子技術핸드북, オム社 pp.154-160, 1991.
 9. Hyoun Soo Kim and V. Ramaswamy, "Tapered, both in dimension and in index, velocity coupler : theory and experiment", IEEE J. of Quantum Wlectronics, Vol.29, No.4, pp.1158-1166, 1993.
 10. G. S. Kino, "Acoustic waves, devices, imaging and analog signal processing", Prentice-Hall, 1987.
 11. Colin Campbell, "Surface acoustic wave devices and their signal processing applications", ACADEMIC PRESS, 1989